

**Universidade Federal de Ouro Preto**

**Programa de Pós-Graduação em Geotecnia**

---

**Tese**

---

Estudo do  
processo de  
sedimentação,  
compressibilidade e  
adensamento em rejeitos  
de fosfato com o uso de  
coagulantes e floculante

Christ Jesus Barriga Paria

Ouro Preto  
2021



**Christ Jesus Barriga Paria**

**ESTUDO DO PROCESSO DE SEDIMENTAÇÃO,  
COMPRESSIBILIDADE E ADENSAMENTO EM  
REJEITOS DE FOSFATO COM O USO DE  
COAGULANTES E FLOCULANTE**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação  
em Geotecnia do Núcleo de Geotecnia da Escola  
de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto,  
como parte integrante dos requisitos para  
obtenção do título de **Doutor em Geotecnia**.

Orientador: Prof. Dr. Eleonardo Lucas Pereira  
Universidade Federal de Ouro Preto

ESCOLA DE MINAS / UFOP

**OURO PRETO**

**2021**

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

P231e Paria, Christ Jesus Barriga .

Estudo do processo de sedimentação, compressibilidade e adensamento em rejeitos de fosfato com o uso de coagulantes e floculante. [manuscrito] / Christ Jesus Barriga Paria. - 2021.  
222 f.: il.: color., tab..

Orientador: Prof. Dr. Eleonardo Lucas Pereira.

Tese (Doutorado). Universidade Federal de Ouro Preto. Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia.

Área de Concentração: Geotecnia.

1. Rejeitos (Metalurgia) . 2. Sedimentação e depósitos. 3. Rejeitos (Metalurgia) - adensamento. 4. Rejeitos (Metalurgia) - Compressibilidade. 5. Água - Purificação - Floculação . I. Pereira, Eleonardo Lucas. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624.13

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Christ Jesus Barriga Paria**

**Estudo do processo de sedimentação, compressibilidade e adensamento em rejeitos de fosfato com o uso de coagulantes e floculante**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de **Doutor em Geotecnia**

Aprovada em 09 de abril de 2021

### Membros da banca

Prof. Dr. Eleonardo Lucas Pereira - orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Prof. Dr. Lucas Deleon Ferreira - (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Prof. Dr. Hernani Mota de Lima - (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Profª. Drª. Terezinha de Jesus Espósito Barbosa (Universidade Federal de Minas Gerais)  
Dr. Luis Martin Tejada Cervantes - (Vale S.A.)

O Prof. Dr. Eleonardo Lucas Pereira, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 05/07/2021



Documento assinado eletronicamente por **Eleonardo Lucas Pereira, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/07/2021, às 15:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0190489** e o código CRC **BB949D06**.



# DEDICATÓRIA

*À minha amada família*

## AGRADECIMENTOS

Ao Grande Arquiteto do Universo por todas as graças me outorgadas. Senhor, permitiste-me que eu pudesse vislumbrar um pálido clarão de tua luz ao ingressar nos mistérios da ciência. Ajuda-me, pois, a ser também luz para iluminar os caminhos que abristes para mim, para os que agora acompanho e para os que talvez um dia me sigam.

À minha família, a cada um de vocês que me ajudaram a continuar este desafio. À minha mãe Genoveva sempre com suas orações fortaleceu-me espiritualmente, à minha mãe Ofélia sempre me animando em todo momento, ao meu pai Jorge sempre mostrando-me mais retos para minha vida, e a minha irmã Alejandra sempre alegrando a minha vida.

Ao meu orientador e ao pessoal do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas (NUGEO). O Prof. Dr. Eleonardo Lucas Pereira quem durante os anos do doutorado foi um importante pilar para a conclusão desta pesquisa. Aos meus amigos técnicos dos laboratórios mostrando sempre seu apoio. Aos colegas pelas discussões na hora do café.

Aos meus amigos, que por estar marcado em nossos destinos, conhecemo-nos aqui no Brasil, especialmente Ivon, Lina e German, compartilhando quase tudo no dia a dia. Aos meus amigos que o curso também me deu, Maria e Yesser, pelos momentos no nosso NUGEO e fora dele. E a todos que ainda continuamos conversando e rindo.

A UFOP, CAPES, FAPEMIG e Fundação Gorceix pelo apoio financeiro, ao Laboratórios de Saneamento Ambiental da UFOP pelos ensaios complementares, a Kemira pelo material fornecido para realizar uma parte deste estudo. À Companhia Mineira Miski Mayo pelo apoio na disponibilização de amostras e de dados para a pesquisa.

*Et comment l'homme peut mourir mieux que d'affronter chances  
peur, pour les cendres de ses pères, et les temples de ses dieux*

*Horacio Cocles, VI.A.C.*

*And how can a man die better, than facing fearful odds, for the ashes of  
his fathers, and the temples of his gods.*

*Horacio Cocles, VI.A.C.*

*Y qué mejor manera de morir puede tener un hombre, que,  
enfrentando las adversidades, por las cenizas de sus padres y los  
templos de sus dioses.*

*Horacio Cocles, VI.A.C.*

*E como pode um homem morrer melhor, do que lutando contra o  
desconhecido, pelas cinzas de seus pais e pelos templos de seus deuses.*

*Horacio Cocles, VI.A.C.*

## RESUMO

A gestão de disposição de rejeitos de baixa densidade por via úmida, tal como o de fosfato, é de extrema relevância na indústria da mineração, sendo imprescindível uma caracterização detalhada dos deles. A utilização de teorias de adensamento a grandes deformações já é amplamente feita há décadas, dessa forma torna-se indispensável realizar estudos aprimorando um modelo deposicional fundamentalmente consistente, relacionados às grandes deformações experimentadas pelo rejeito durante o processo de adensamento. Portanto, esta tese padronizou uma metodologia de análise desde o processo de sedimentação (mediante ensaios de coluna), o processo de adensamento, realizado pelo ensaio de adensamento induzido por percolação (um ensaio não convencional em particular), além de um programa de simulações numéricas. O rejeito procedente da etapa de beneficiamento da Mina de Bayovar, no Peru, permitiu montar os corpos de prova para diferentes teores de sólidos, com limites entre a faixa de 8,5% a de 21%. A metodologia também foi agregada o uso de coagulantes e floculante com dosagens de 20 ppm a 120 ppm para entender o comportamento do rejeito frente às reações químicas que poderiam ser experimentadas, além de conhecer sua resposta nos processos de sedimentação, compressibilidade e adensamento. Os resultados obtidos com os ensaios determinaram com precisão a razão da velocidade de sedimentação e as relações de compressibilidade e permeabilidade para polpas do rejeito de baixa densidade, referindo-se às diferentes condições do teor de sólidos e da dosagem do floculante. Os ensaios de adensamento por percolação ajudaram no entendimento do rejeito de fosfato com a obtenção dos parâmetros constitutivos que foram usados diretamente na modelagem numérica de adensamento de grandes deformações (através do software CONDES0), de onde foram obtidas simulações de enchimento de um reservatório. Esses modelos, que dependem das relações de sedimentação, compressibilidade e permeabilidade, podem ser usados para a seleção de estratégias de disposição de rejeitos de mineração na etapa de armazenamento nos reservatórios de um projeto de mineração.

Palavras-chave: rejeitos, sedimentação, adensamento, compressibilidade, floculação.

## ABSTRACT

The management of the disposal of low-density tailings, such as that of phosphate, is extremely relevant in the mining, and a detailed characterization of the tailings is essential. The use of densification theories for large deformations has been widely used for decades, thus, it is essential to carry out studies improving a fundamentally consistent depositional model, related to the large deformations experienced by the tailings during the consolidation process. Therefore, this thesis standardized an analysis methodology from the sedimentation process (through column tests), the consolidation process, carried out by the hydraulic consolidation test (a non-conventional test in particular), in addition a program of numerical simulations was integrated. The tailings from the beneficiation stage of the Bayovar Mine, in Peru, made it possible to prepare the specimens for different solid content, with limits ranging from 8,5% to 21%. The methodology also included the use of coagulants and flocculant with dosages from 20 ppm to 120 ppm to understand the behavior of the tailings in the face of chemical reactions that could be experienced, in addition to knowing their response in the sedimentation, compressibility and consolidation processes. The results obtained with the tests accurately determined the ratio of the particle's sedimentation velocity and the compressibility and permeability ratios for low density phosphate tailings, referring to the different conditions of the solids content and flocculant dosage. The hydraulic consolidation tests helped to understand the phosphate tailings by obtaining the constitutive parameters that were used directly in the numerical modeling of large deformation consolidation (through the CONDES0 software), which were obtained simulations of filling a reservoir. These models, which depend on the sedimentation, compressibility, and permeability ratios, can be used for the selection of mining tailings disposal strategies in the storage stage in the reservoirs of a mining project.

Keywords: tailings, sedimentation, consolidation, compressibility, flocculation.

## RESUMEN

La gestión de disposición de relaves de baja densidad por vía húmeda, como es el caso de los fosfatos, es un tema muy relevante en la industria minera, por lo tanto, es necesaria una caracterización detallada de estos. El uso de teorías de consolidación para grandes deformaciones se ha utilizado ampliamente durante décadas, por lo tanto, es esencial llevar a cabo estudios que mejoren un modelo deposicional fundamentalmente consistente, relacionado con las grandes deformaciones experimentadas por los relaves durante el proceso de consolidación. Por lo tanto, esta tesis de doctorado estandarizó una metodología de análisis a partir del proceso de sedimentación a través de ensayos de sedimentación en probeta y el proceso de consolidación realizado por una prueba no convencional, en particular, la prueba de consolidación inducida hidráulica, además de un programa de simulaciones numéricas. Los relaves del proceso de beneficio de la mina Bayóvar en Perú permitieron preparar los especímenes para diferentes niveles de sólidos con límites que van del 8,5% al 21%. En la metodología experimentó el uso de coagulantes y floculante con dosificaciones de 20 a 120 ppm para comprender el comportamiento de los relaves ante las reacciones químicas que podrían generarse y conocer su respuesta en los procesos de sedimentación, compresibilidad y consolidación. Los resultados obtenidos de las pruebas demostraron determinar con precisión la relación de la velocidad de sedimentación y las relaciones de compresibilidad y permeabilidad para las pulpas de relaves de baja densidad con respecto a las diferentes condiciones del contenido de sólidos y la dosificación del floculante. Los ensayos de consolidación hidráulica ayudaron a comprender los relaves de fosfato al obtener los parámetros constitutivos que se usaron directamente en el modelado numérico de la consolidación por grandes deformaciones, con el procesamiento del software CONDES0 se obtuvieron simulaciones de llenado de un depósito de relaves. Estos modelos, que dependen de las relaciones de sedimentación, compresibilidad y permeabilidad, pueden usarse en la selección de estrategias de disposición de relaves mineros en la etapa de almacenamiento en los reservorios de un proyecto minero.

Palabras clave: relaves, sedimentación, consolidación, compresibilidad, floculación.

## RÉSUMÉ

La gestion de l'élimination des résidus de faible densité par voie humide, comme c'est le cas des phosphates, est une question très pertinente dans l'industrie minière, par conséquent, une caractérisation détaillée de ceux-ci est nécessaire. L'utilisation des théories de densification pour les grandes déformations est largement utilisée depuis des décennies, par conséquent, il est essentiel de mener des études qui améliorent un modèle de dépôt fondamentalement cohérent, lié aux grandes déformations subies par les résidus pendant le processus de consolidation. Par conséquent, cette thèse de doctorat a normalisé une méthodologie d'analyse basée sur le processus de sédimentation à travers des tests de sédimentation et le processus de consolidation effectué par un test non conventionnel, en particulier le test de consolidation induite hydraulique, en plus d'un programme de simulation numérique. Les résidus du processus d'enrichissement de la mine de Bayovar au Pérou ont permis de préparer des échantillons pour différents niveaux de solides avec des limites allant de 8,5% à 21%. Dans la méthodologie a également expérimenté l'utilisation de coagulants et flocculants avec des variations de dosages de 20 ppm à 120 ppm a également été expérimenté pour comprendre le comportement des résidus face aux réactions chimiques qui pourraient être générées et connaître leur réponse en sédimentation, compressibilité et consolidation. Les résultats obtenus à partir des tests ont permis de déterminer avec précision la relation entre la vitesse de sédimentation et les relations de compressibilité et de perméabilité des pâtes de résidus à faible densité en fonction des différentes conditions de la teneur en solides et du dosage du flocculant. Les tests de consolidation hydraulique ont permis de comprendre les résidus de phosphate en obtenant les paramètres constitutifs directement utilisés dans la modélisation numérique de la consolidation pour les grandes déformations, avec le traitement du logiciel CONDES0, des simulations de remplissage d'un gisement de résidus ont été obtenues. Ces modèles, qui dépendent des relations de sédimentation, de compressibilité et de perméabilité, peuvent être utilisés dans la sélection des stratégies d'élimination des résidus miniers au stade du stockage dans les réservoirs d'un projet minier.

Mots clés : résidus miniers, sédimentation, consolidation, compressibilité, floculation

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO 2

Figura 2.1 - Esquema representativo de pontos em um fluido nos sistemas lagrangeano e euleriano (Adaptado de Takagi <i>et al.</i> , 2011) .....	11
Figura 2.2 - Ciclo de sedimentação de uma suspensão.....	16
(Adaptado de El-Shall e Bogan, 1992) .....	16
Figura 2.3 - Metodologia esquemática do teste de sedimentação de zona estática (Adaptado de Zhao I, 2004) .....	17
Figura 2.4 - Resultados de testes de sedimentação. (A) Sem agitação prévia. (B) Com 10 min de agitação anterior (Asensi <i>et al.</i> , 2019) .....	18
Figura 2.5 - Resultados de regressões iniciais de velocidade de sedimentação e resíduos do modelo de Richardson e Zak (Asensi <i>et al.</i> , 2019) .....	18
Figura 2.6 - Condições iniciais: (a) Caso totalmente drenado; b) Caso piezométrico principal (Adaptado de Huerta <i>et al.</i> , 1988) .....	20
Figura 2.7 - Esquema de ensaio HCT (Adaptado de Abu-Hejleh <i>et al.</i> , 1996) .....	21
Figura 2.8 - Resultados experimentais do teste de consolidação induzida por infiltração (Abu-Hejleh <i>et al.</i> , 1996) .....	22
Figura 2.9 - Distribuição mundial por tipo de depósito das reservas de fosfato (FAO, 2004) .....	24
Figura 2.10 - Depósito de fosfato em Sechura (Fassbender, 1967) .....	26
Figura 2.11 - Unidades geomorfológicas da área de estudo. (Rodríguez <i>et al.</i> , 2012)...	28
Figura 2.12 - Unidades geomorfológicas da área de estudo (Rodríguez <i>et al.</i> , 2012)....	32

### CAPÍTULO 3

Figura 3.1 - Estágios (sequência) de deposição das partículas de solos finos .....	34
(Adaptado de Imai, 1981) .....	34
Figura 3.2 - Evolução da velocidade de sedimentação no desenho básico de espessadores. (Fogwill, 2005 citado por Falcucci, 2007) .....	39
Figura 3.3 - Teste para o comportamento de sedimentação (WILLS, 1997 citado por	



Guimarães, 2010).....	41
Figura 3.4 - Efeito da salinidade na floculação (Krone, 1962).....	43
Figura 3.5 - Velocidades de sedimentação de sedimentos com floculante (Krone, 1962) .....	43
Figura 3.6 - Valor de estabilidade em função da salinidade para fração granulométrica de sedimentos Pamlico (Edzwald <i>et al.</i> , 1974).....	45
Figura 3.7 - Relação da velocidade e o diâmetro do floco (Verney, 2009).....	49
Figura 3.8 - Relação da velocidade e o diâmetro do floco em diferentes estuários (Verney, 2009) .....	49
Figura 3.9 - Estrutura química do sulfato de alumínio .....	55
Figura 3.10 - Sulfato de alumínio, quando dissolvido em água .....	55
Figura 3.11 - Estrutura química do sulfato de ferro (II) .....	56
Figura 3.12 - Sulfato de ferro (II), quando dissolvido em água.....	57
Figura 3.13 - Polimerização da poliacrilamida .....	59
<b>CAPÍTULO 4</b>	
Figura 4.1 - Processamento de rocha fosfatada em Bayovar (Adaptado de Cabezas, 2016) .....	61
Figura 4.2 - Mapa da Região Grau destacando Sechura e as linhas de transporte da mina até o porto (Adaptado de CMMM, 2017) .....	63
Figura 4.3 – Fluxograma de atividades desenvolvidas na metodologia proposta .....	64
Figura 4.4 – Curvas granulométricas das amostras obtidas com o granulômetro a laser: A, sem hexametáfosfato e sem sonar. B, com hexametáfosfato e sem sonar. C, sem hexametáfosfato e com sonar. D, com hexametáfosfato e com sonar .....	66
Figura 4.5 - Difratograma de raios-X do rejeito de fosfato (Pereira, 2017) .....	68
Figura 4.6 - MEV do rejeito de fosfato – aproximação 2000X (Pereira, 2017) .....	69
Figura 4.7 - Exemplo de espectro de EDS, NanoLab (Pereira, 2017).....	70
Figura 4.8 – Representação estatística dos valores obtidos da massa do rejeito em 1000 ml e linha de tendência .....	71

Figura 4.9 – Exemplo do cálculo para aumentar o teor de sólidos de 16% a 18,5%.....	72
Figura 4.10 – Exemplo do cálculo para aumentar o teor de sólidos de 16% a 13,5%....	73
Figura 4.11 – Resultados do segundo e terceiro procedimento da metodologia aplicada .....	74
Figura 4.12 - Regimes da Sedimentação (Adaptado de Ekama <i>et al.</i> , 1997) .....	75
Figura 4.13 - Ensaio de coluna na sedimentação indicando a interface suspensão-líquido .....	76
Figura 4.14 - Ilustração do processo de coagulação química (modificado de Martínez-Huitle, 2018) .....	77
Figura 4.15 - Esquema de interação do rejeito com o floculante .....	77
Figura 4.16 - Processo de sedimentação para um teor de sólidos de 21% utilizando coagulante sulfato de alumínio .....	78
Figura 4.17 - Curvas de sedimentação para um Sw de 13,5% com sulfato de ferro como coagulante com diferentes concentrações .....	80
Figura 4.18 - Esquema de interação entre duas partículas sólidas na presença de floculante (Ji, 2013) .....	80
Figura 4.19 - Curvas de sedimentação para um Sw de 13,5% com C-498 como floculante orgânico com diferentes concentrações .....	82
Figura 4.20 - O processo de sedimentação em coluna segundo a teoria de Kynch .....	85
Figura 4.21 - Interpretação gráfica dos resultados de Kynch .....	86

## **CAPÍTULO 5**

Figura 5.1 - Interpretação gráfica dos ensaios de coluna para amostras de rejeitos de fosfato com aditivos .....	96
Figura 5.2 - Curvas das velocidades máximas de sedimentação para Sw de 13,5% com todas as concentrações de sulfato de alumínio e sulfato de ferro (II).....	99
Figura 5.3 - Curvas das velocidades de sedimentação para Sw de 11% com todas as concentrações de sulfato de alumínio e C-498 .....	103
Figura 5.4 - Curvas das velocidades de sedimentação para Sw de 8,5% com todas as concentrações de sulfato de alumínio para rejeito secado e natural .....	107

Figura 5.5 - Curvas das velocidades de sedimentação ao longo do ensaio para Sw de 16% com coagulante e floculante para amostras com salinidade natural e dessalinizadas...	108
Figura 5.6 - Curvas de compressibilidade dos corpos de prova ensaiados (A sem aditivos; B com coagulante; C com floculante).....	110
Figura 5.7 - Curvas de compressibilidade para os corpos de prova ensaiados com Sw de 8,5% e 11% (A, sem aditivos; B com coagulante; C, com floculante).....	110
Figura 5.8 - Curvas de compressibilidade para os corpos de prova ensaiados com Sw de 13,5% a 21% (A, sem aditivos; B com coagulante; C, com floculante).....	111
Figura 5.9 – Curvas específicas de compressibilidade para o corpo de prova (A, sem aditivos, Sw de 16%; B com coagulante, Sw de 13,5%; C, com floculante, Sw de 13,5% e 16%) .....	111
Figura 5.10 - Curvas de permeabilidade dos corpos de prova ensaiados (A sem aditivos; B com coagulante; C com floculante).....	112
Figura 5.11 - Curvas de permeabilidade para os corpos de prova ensaiados com Sw de 8,5% e 11% (A sem aditivos; B com coagulante; C com floculante).....	112
Figura 5.12 - Curvas de permeabilidade para os corpos de prova com Sw de 13,5% a 21% (A sem aditivos; B com coagulante; C com floculante) .....	113
Figura 5.13 - Curva de permeabilidade para o corpo de prova com Sw de 16% (A sem aditivos; B com coagulante; C com floculante).....	113
Figura 5.14 – Comparação das curvas de compressibilidade dos corpos de prova com salinidade oriunda do beneficiamento e dessalinizadas.....	114
Figura 5.15 – Comparação das curvas de permeabilidade dos corpos de prova com salinidade oriunda do beneficiamento e dessalinizadas.....	115
Figura 5.16 – Comparação dos perfis de índices de vazios após adensamento para cada estágio da simulação do enchimento escalonado corrigido feitos no Tanque TK-105	118
Figura 5.17 – Comparação dos perfis de teor de sólidos após adensamento para cada estágio da simulação do enchimento escalonado corrigido feitos no Tanque TK-105	119
Figura 5.18 – Comparação dos perfis de poropressão após adensamento para cada estágio da simulação escalonada corrigida feitos no Tanque TK-105 .....	120

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO 2

Tabela 2.1 – Variedades de Apatita e Propriedades Cristalográficas e Ópticas Seleccionadas.....	24
---	----

### CAPÍTULO 3

Tabela 3.1 – Classificação dos tipos de sedimentação (Spottiswood, 1989 citado por Guimarães, 2010).....	37
--	----

### CAPÍTULO 4

Tabela 4.1 – Propriedades físicas do rejeito .....	66
Tabela 4.2 – Resultados da análise do componente da amostra (%wt) .....	67
Tabela 4.4 - Salinidade do rejeito estudado representado em ppm .....	74
Tabela 4.5 – Propriedades típicas do floculante selecionado .....	81
Tabela 4.5 – Propriedades de Turbidez para diferentes tempos .....	88
Tabela 4.6 – Dados iniciais dos corpos de prova mensurados.....	90
Tabela 4.7 – Dados iniciais dos corpos de prova – calculados.....	91
Tabela 4.8 – Dados dos corpos de prova após sedimentação e adensamento por peso próprio – $\sigma_0$ - calculados .....	91
Tabela 4.9 – Dados do ensaio de adensamento induzido por percolação .....	92
Tabela 4.10 – Dados do ensaio de carregamento em etapas.....	92
Tabela 4.11 – Dados do ensaio de permeabilidade por percolação .....	92
Tabela 4.12 – Parâmetros constitutivos obtidos no ensaio HCT .....	93
Tabela 4.13 – Relações constitutivas para a compressibilidade obtidas no ensaio HCT	93
Tabela 4.14 – Relações constitutivas para a permeabilidade obtidas no ensaio HCT....	93
Tabela 4.15 – Parâmetros constitutivos obtidos no ensaio HCT em amostras dessalinizadas.....	94

Tabela 4.16 – Relações constitutivas para a compressibilidade obtidas no ensaio HCT em amostras dessalinizadas .....	94
--	----

Tabela 4.17 – Relações constitutivas para a permeabilidade obtidas no ensaio HCT em amostras dessalinizadas .....	94
---	----

## **CAPÍTULO 5**

Tabela 5.1 – Velocidades de sedimentação máximas para Sw de 8,5%, 11% e 13,5% ao longo do ensaio de coluna com sulfato de alumínio e sulfato de ferro (II) .....	98
--	----

Tabela 5.2 – Velocidades de sedimentação máximas para os 6 teores de sólidos ao longo do ensaio de coluna com sulfato de alumínio e C-498 .....	102
---	-----

Tabela 5.3 – Melhores velocidades de sedimentação e desempenhos para os 6 teores de sólidos ao longo do ensaio de coluna com sulfato de alumínio e C-498 .....	103
--	-----

Tabela 5.4 – Velocidades de sedimentação máximas para os 6 teores de sólidos ao longo do ensaio de coluna com sulfato de alumínio para rejeito secado e normal .....	105
--	-----

Tabela 5.5 – Melhores velocidades de sedimentação e desempenhos para os 6 teores de sólidos ao longo do ensaio de coluna para rejeito secado e normal .....	106
---	-----

Tabela 5.6 – Velocidades com coagulante e floculante para amostras com salinidade natural e amostras dessalinizadas .....	108
---	-----

Tabela 5.7 – Velocidades com coagulante e floculante para amostras em Ensaio de Coluna e Jar Test .....	109
---	-----

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

Å	Angström
$a$	Coordenada reduzida de um ponto com coordenada lagrangeanas
$a_1$	Rádio 1
$a_2$	Rádio 2
ABNT	Associação Brasileira de Normas técnicas
Ag	Prata
Al	Alumínio
Al(OH) <sub>3</sub>	Hidróxido de alumínio
As	Arsênico
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
B	Boro
BS	<i>British Standards</i>
BSI	<i>British Standards Institution</i>
Ca	Cálcio
Cd	Cádmio
Cf	Concentração de traçador Euleriano
CH <sub>2</sub> CHCONH <sub>2</sub>	Acrilamida
cm <sup>3</sup>	Centímetro cúbico
CMMM	Companhia Mineira Miski Mayo
COD	<i>Chemical Oxygen Demand</i>
Cr	Cromo
CTGA	Centro Tecnológico De Geotecnia Aplicada
Cu	Cobre
d	Distância
DSF	<i>Dry Salts Free</i>
$e$	Índice de vazios
$e_0$	Índice de vazios quando $t=0$
$e_{00}$	Índice de vazios para tensão efetiva nula
F	Flúor
FAO	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i>
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de Ferro
g	Gramo
GRAS	<i>Generally Recognized as Safe</i>

Gs	Gravidade específica
H	Hidrogênio
H <sup>+</sup>	Íon de hidrogênio
H <sub>2</sub> S	Sulfeto de hidrogênio
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Ácido Sulfúrico
HCT	<i>Hydraulic Consolidaton Test</i>
IFDC	<i>International Fertilizer Development Center</i>
InSAR	<i>Interferometric Synthetic Aperture Radar</i>
IP	Índice de Plasticidade
K	Coeficiente hidráulico
K	Potássio
K <sub>2</sub> O	Óxido de Potássio
km	Quilômetro
kPa	Quilopascal
l	Litro
L	litro
Li	Lítio
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
m	Metro
Ma	Milhão de anos
MFT	<i>Mature Fine Tailings</i>
mg	Miligramo
Mg	Magnésio
Mg <sup>2+</sup>	Íon Magnésio
MgO	Óxido de Magnésio
min	Minuto
mL	Mililitros
ml	Mililitros
mm	Milímetro
Mn	Manganésio
mPa	Milipascal
mV	Milivolts
Na	Sódio
Na <sup>+</sup>	Íon de sódio
Na <sub>2</sub> O	Óxido de sódio

NBR	Norma Brasileira
NE	Nordeste
Ni	Níquel
NO	Noroeste
NUGEO	Núcleo de Geotecnia
O	Oxigênio
OH <sup>-</sup>	Íon de hidroxila
P	Fósforo
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Pentóxido de fósforo
pH	Potencial de hidrogeniônico
PNAS	<i>Partially Neutralized Aluminium Sulphate</i>
PO <sub>4</sub>	Fosfato
ppm	Partes por milhão
ppt	Partes por trilhão
r	Revoluções
Sb	Antimônio
Se	Selênio
SiO <sub>2</sub>	Dióxido de Silício
Sn	Estanho
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Íon Sulfato
Sr	Estrôncio
S <sub>w</sub>	Teor de sólidos
t	Tempo
Th	Tório
TSF	<i>Tailings Storage Facility</i>
U/Pb	Método de datação geocronológica
u <sub>0</sub>	Poropressão estática
U <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de Urânio
UFOP	Universidade Federal de Ouro Preto
UNIDO	<i>United Nations Industrial Development Organization</i>
V	Vanádio
V <sub>s</sub>	Volume de sólidos
V <sub>s</sub>	Velocidade de Sedimentação
w	Teor de umidade
w <sub>i</sub>	Teor de umidade inicial do ensaio
w <sub>o</sub>	Teor de umidade dessa fase



$Sw_i$	Teor de sólidos inicial do ensaio
$Sw_o$	Teor de sólidos na sedimentação
$X$	Método de Lagrange
$z$	Altura de sólidos
$z$	Altura de caída de sedimentos
$z_0$	Altura de caída de sedimentos no $t = 0$
$z_i$	Altura de caída de sedimentos inicial
$Zn$	Zinco
$\Delta a$	Incremento dimensão a
$\Delta b$	Incremento dimensão b
$\Delta t$	Incremento de tempo
$\Delta h$	Diferencial de altura de caída de sedimentos
$Mm$	Micrômetro
$a$	Coordenada reduzida de um ponto com coordenada lagrangeanas
$U$	Operador linear que produz a solução da equação de Stokes
$\tau$	Tensão cisalhante
$\sigma$	Tensão efetiva
$v$	Velocidade
$\xi$	Coordenada euleriana
$\rho_s$	Massa específica do sólido
$\rho_w$	Massa específica da água
$\rho_f$	Densidade do floco
$\varepsilon_s$	Concentração da interface superior
$\varepsilon_{s0}$	Concentração da interface superior no $t = 0$
$\varepsilon_m$	Concentração da interface médio
$\varepsilon_{sm}$	Concentração da interface superior médio
$\pm$	Variação de mais ou menos
$^{\circ}C$	Graus centígrados
1D	Unidimensional
3D	Tridimensional

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>1</b>
INTRODUÇÃO .....	1
1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	1
1.2. JUSTIFICATIVA .....	3
1.3. OBJETIVOS DO TRABALHO.....	4
1.3.1. Objetivo geral .....	4
1.3.2. Objetivos específicos .....	4
1.4. ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	5
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>7</b>
PROPRIEDADES DOS REJEITOS FINOS DE FOSFATO ORIUNDOS DE UM DEPÓSITO SEDIMENTAR .....	7
2.1. INTRODUÇÃO .....	7
2.2. COMPRESSIBILIDADE E ADENSAMENTO DOS REJEITOS FINOS .....	8
2.2.1. Compressibilidade dos rejeitos finos .....	8
2.2.2. Adensamento dos rejeitos finos .....	9
Sistemas de coordenadas Lagrangeano e Euleriano.....	10
Teoria do adensamento das grandes deformações .....	11
2.2.3. Ensaios de laboratório aplicados aos rejeitos finos .....	14
Ensaios de coluna de sedimentação .....	14
Ensaios de adensamento induzido por percolação (HCT) .....	19
2.3. MINÉRIO FOSFATO.....	22
2.3.1 Depósitos de rocha fosfática .....	22
2.3.2. Depósitos de fosfato de Sechura .....	25
2.3.3 Geologia do Depósito de Fosfato.....	28
Geomorfologia .....	28

Repisa Costanera.....	29
Tablazos .....	29
Cordilheira da Costa .....	29
Cordilheira de Sallique .....	30
Terraços Marinhos .....	30
Depressões .....	30
Estuários.....	30
Lhaneza de Inundação .....	30
Vales .....	31
Depresión Para-andina o Llanura Costanera .....	31
Cordilheira Occidental.....	31
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>33</b>
SEDIMENTAÇÃO: FENÔMENOS DE SALINIDADE, COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO.....	33
3.1 INTRODUÇÃO .....	33
3.2 DISTRIBUIÇÃO DE SEDIMENTOS EM BARRAGENS .....	34
3.3 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS FINOS .....	35
3.4 CAUSAS DA SEDIMENTAÇÃO .....	36
3.4.1 Mecanismos de colisão .....	37
3.4.2 Mecanismos de coesão e agregação.....	38
3.5 VELOCIDADE DE SEDIMENTAÇÃO.....	39
3.6 EFEITO DA SALINIDADE NA VELOCIDADE DE SEDIMENTAÇÃO ....	42
3.7 PROCESSO DE COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO.....	50
3.7.1 Mecanismos de coagulação e floculação .....	53
3.7.2 Coagulantes.....	54
Sulfato de alumínio .....	54
Sulfato de Ferro.....	56

3.7.3 Floculantes orgânicos .....	57
Polímero .....	58
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>	<b>60</b>
PROGRAMA EXPERIMENTAL .....	60
4.1 INTRODUÇÃO .....	60
4.2 PROPRIEDADES DO REJEITO .....	65
4.3 ANÁLISES QUÍMICA E MINERALÓGICA .....	67
4.3.1 Generalidades.....	67
4.3.2 Análise Química .....	67
4.3.3 Análise mineralógica .....	68
4.4 ENSAIOS ESPECIAIS .....	70
4.4.1 Metodologia padronizada .....	70
Primeira fase: teor de sólidos .....	70
Macro para o cálculo do teor de sólidos requerido .....	72
Segunda fase: sedimentação .....	73
Terceira fase: compressibilidade e adensamento .....	73
4.4.2 Ensaio de sedimentação em coluna .....	74
A. Rejeito com coagulante .....	76
Sulfato de Alumínio.....	77
Sulfato de Ferro .....	79
B. Rejeito com floculante orgânico.....	80
C-498 .....	81
C. Rejeito alterado mediante secagem em estufa.....	83
Cálculo da Velocidade de Sedimentação .....	85
4.4.3 Ensaio de <i>Jar Test</i> .....	87
4.4.4 Ensaio de adensamento induzido por percolação (HCT).....	88

Efeito da salinidade da amostra no adensamento e na permeabilidade.....	94
<b>CAPÍTULO 5 .....</b>	<b>95</b>
ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	95
5.1 INTRODUÇÃO .....	95
5.2 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS .....	95
5.2.1 Análise dos resultados dos ensaios de sedimentação em coluna .....	95
A. Análise dos resultados dos ensaios entre coagulantes inorgânicos.....	97
B. Análise dos resultados dos ensaios com uso de coagulante inorgânico e floculante orgânico .....	99
C. Análise dos resultados dos ensaios em condições de secado em estufa e em condições naturais .....	104
D. Análise dos resultados dos ensaios entre coagulante e floculante em amostra dessalinizada .....	107
E. Análise dos resultados dos ensaios de coluna e ensaios de Jar Test ....	108
5.2.2 Análise dos resultados dos ensaios HCT .....	109
Apresentação e discussão dos resultados para as amostras naturais .....	109
Apresentação e discussão dos resultados para as amostras dessalinizadas .....	114
5.3 SIMULAÇÕES DE ENCHIMENTO DE TANQUE .....	116
<b>CAPÍTULO 6 .....</b>	<b>121</b>
CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA OUTROS ESTUDOS .....	121
6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	121
6.2 CONCLUSÕES .....	122
6.2.1 Influência da salinidade .....	122
Influência da Salinidade durante os Ensaios de Coluna.....	122
6.2.2 Ensaios de sedimentação em coluna .....	123
Efeito do sulfato de alumínio e sulfato ferroso nos estágios de sedimentação e adensamento .....	123

Efeito do sulfato de alumínio e C-498 nos estágios de sedimentação e adensamento .....	125
Efeito do sulfato de alumínio nos estágios de sedimentação e adensamento para amostras alteradas em forno de laboratório e condições naturais .....	126
6.2.3 Ensaio de adensamento induzido por percolação – HCT .....	127
Ensaio HCT sem aplicação de aditivos .....	127
Ensaio HCT com aplicação de aditivos .....	128
Ensaio HCT com amostras dessalinizadas .....	129
6.2.4 Simulações de enchimento.....	130
6.3 SUGESTÕES PARA OUTROS ESTUDOS .....	130
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>131</b>
<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>147</b>
<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>149</b>
<b>APÊNDICE C.....</b>	<b>152</b>
<b>APÊNDICE D.....</b>	<b>153</b>
<b>APÊNDICE E.....</b>	<b>155</b>
<b>APÊNDICE F.....</b>	<b>157</b>
<b>APÊNDICE G.....</b>	<b>160</b>
<b>APÊNDICE H.....</b>	<b>162</b>
<b>APÊNDICE I.....</b>	<b>165</b>
<b>APÊNDICE J.....</b>	<b>167</b>
<b>APÊNDICE K.....</b>	<b>173</b>
<b>APÊNDICE L.....</b>	<b>185</b>

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Desde a década de 2000, o setor mineiro teve um alto crescimento industrial, acompanhado de um aumento no volume de resíduos gerados, os quais quando não corretamente tratados e dispostos, podem causar sérios problemas ao meio ambiente (Cooke e Johnson, 2002). Esses procedimentos não são indiferentes para a mineração, além de ser mais regulamentado, o processo de disposição de rejeitos está constantemente relacionado às construções de grandes estruturas de contenção, seja pelas dificuldades na concessão de novas áreas para esse fim ou comumente pelo elevado volume desses resíduos gerados no processo metalúrgico do beneficiamento de mineral.

Em função dos ensaios realizados para a obtenção de fosfato de boa qualidade, a disposição dos rejeitos gerados pelo beneficiamento é destinada de duas formas, os rejeitos grossos são dispostos em áreas de disposição tipo pilhas já existente para esse intuito, e os finos são enviados para um tanque, cumprindo rigorosamente os parâmetros ambientais estabelecidos por lei (CMMM, 2017). O conhecimento desses materiais particulados justifica os estudos com ênfase em avaliações das propriedades de compressibilidade e adensamento (Pereira, 2017).

Desde a década de 80, aperfeiçoar as áreas de disposição e, assim, em impactos ambientais consideravelmente menores tem sido de muito interesse. Existem casos em que as características químicas dos rejeitos podem ser determinantes na definição das melhores formas de disposição (Vick, 1983). Portanto, nas últimas décadas houve um grande investimento para o desenvolvimento de estudos com fins de novas tecnologias e pesquisa para a disposição final do rejeito de mineração, sendo maioritariamente a sua armazenagem em barragens, e muito pouco para a sua reutilização (Lottermoser, 2011).

Geralmente, durante a etapa de beneficiamento, no processamento do mineral são utilizados coagulantes ou floculantes para separar sólidos finos da água residual, separar uns dos outros, com o objetivo de poupar a água durante o procedimento, além de melhorar a sedimentação (Dao et al., 2016; Skei e Syvitski, 2013). Durante as etapas de tratamento e disposição, uma aceleração no processo de sedimentação expressa uma influência significativa nas etapas de adensamento e compressibilidade. Dada a importância da otimização do tempo dessa etapa é fundamental o estudo do comportamento dos agentes coagulantes ou floculantes nos rejeitos.

Segundo Bratby (2006), a velocidade de sedimentação mostra-se alta devido ao processo de floculação, conseguindo rapidamente diminuir a turbidez e o risco de acontecer uma suspensão do material durante a sedimentação, mostrando-se uma ferramenta amigável. Também Bohuslav Dobias (2005), e por esses motivos a busca de coagulantes ou floculantes que tenham uma alta eficiência nos aspectos de sedimentação e volume dos flocos, índice de volume de lama, teor de sólidos depositados, turbidez ou claridade do sobrenadante ou recuperação de água. O baixo custo sempre se tornou o desafio em muitos estudos.

Os principais coagulantes químicos utilizados são o sulfato de alumínio (Bulushu *et al.*, 1979; Dolejs, 1989; Boisvert *et al.*, 1997; Luttrell, 2015; Hea *et al.*, 2019) e sulfato férrico (Li *et al.*, 1997; Wang *et al.*, 2011; Asadi *et al.*, 2017; Liaoab *et al.*, 2019), alguns de origem orgânico estão sendo investigados mais intensamente como o polímero poliacrilamida C-498 (Colic, 2011; Liu *et al.*, 2014; Kumar *et al.*, 2015; Chen *et al.*, 2018). De modo geral, a etapa inicial do tratamento de resíduos contendo materiais particulados comumente é a coagulação, a qual com uma grande probabilidade, deve ter uma influência significativa nas seguintes etapas do tratamento. Dependendo do material particulado, existe a necessidade da utilização deles.

Conforme Pereira (2017), o conhecimento do comportamento geotécnico dos rejeitos finos, pode garantir uma melhor concepção e uma maior gestão das obras de contenção, um ponto essencial é o processo de adensamento desses materiais, que não devem ser avaliados convencionalmente com fundamento nas teorias clássicas. Vários fatores afetam a etapa de disposição dos rejeitos na estrutura planejada, associados especialmente à sua consistência, dando em resultado um processo de segregação das partículas, diretamente associado à sistemática de lançamento no sistema de contenção.



## 1.2. JUSTIFICATIVA

A continuidade de pesquisas sobre rejeito fino são recomendações realizadas por autores que têm estudado recentemente esse tema com ênfases nos ensaios de laboratório (Pereira, 2017; Baldonio, 2017). Indicações para a otimização do uso de diferentes aditivos para melhorar os processos de sedimentação e adensamento, além de variar as propriedades geotécnicas do rejeito de mineração como o teor de sólidos, como consequência o teor de umidade, importantes na deposição final desse material. Pelo aumento do consumo e a escassez de água doce nas últimas décadas, água salgada é utilizada no beneficiamento do mineral de fosfato, sendo o teor de salinidade um fator primordial na influência da velocidade de sedimentação do material fino, característica própria do rejeito estudado.

A utilização de elementos químicos que aceleram o processo de sedimentação, denominados coagulantes e floculantes (a coagulação como processo químico que envolve a neutralização da carga, enquanto a floculação um processo físico e não envolve a neutralização da carga), que visam um desenvolvimento e otimização de técnicas para melhorar a etapa de armazenagem do material nas barragens. Escolhendo-se os coagulantes e floculante entre inorgânicos e orgânicos, dependendo de fatores ambientais e econômicos, melhoram o difícil manuseio industrial em função do volume gerado e do elevado teor de umidade.

Características específicas dos minerais não metálicos mostram grandes diferenciais geotécnicos dos metálicos, como o processo de compressibilidade e adensamento. Eles são geralmente de menor fluviabilidade do que sulfetos e metais nativos, durante o processo metalúrgico e quando depositados os rejeitos nas barragens, a sedimentação se mostra mais lenta. Uma estrutura apolar gera grande fluviabilidade natural como talco, enxofre e grafite, mas há outros que são mais polarizados que os sulfetos, ou seja, mais hidrofílicos, sendo que uma molécula do material é atraída por moléculas de água e tende a ser dissolvida ela.

No processo de adensamento do rejeito, a sua altura final é afetada pelo uso de coagulantes ou floculantes. Conjuntamente com a propriedade da salinidade que influencia a sedimentação, de acordo com as reações químicas produzidas entre o rejeito e os coagulantes e floculantes. Foram considerados também a importância do pH e

presença de algum íon que seja sensível ao rejeito, tendo sempre controle das condições ambientais em que for realizada.

Para tal, foram efetuadas simulações computacionais em equivalência nas dimensões de projeto e as obtidas no laboratório, especificamente ensaio de coluna e de adensamento hidráulico HCT, do inglês Hydraulic Consolidation Test, no Laboratório de Rejeitos do Centro de Tecnológico de Geotecnia Aplicada (CTGA) do Núcleo de Geotecnia Aplicada (NUGEO) da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Mostrando dessa forma uma alternativa para promover a aceleração dos processos de compressibilidade e adensamento dos rejeitos de fosfato mediante uma análise dos coagulantes e floculantes orgânicos e inorgânicos. Não obstante, a ausência de estudos similares que divulguem discussões mais aprofundadas sobre o assunto sustenta, assim, o interesse em investigar profundamente as pesquisas nesse contexto.

### **1.3. OBJETIVOS DO TRABALHO**

#### **1.3.1. Objetivo geral**

O objetivo deste estudo consiste em avaliar o comportamento dos rejeitos oriundos do beneficiamento de rochas sedimentares marinhas de mineração de fosfato, para a análise da sua sedimentação, compressibilidade, adensamento na influência de diferentes teores de sólidos e analisar a sua influência na sedimentação utilizando agentes que aumentam a velocidade desse processo para depois ver quais seriam os melhores resultados sobre a expectativa do melhor desempenho.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

Quatro objetivos específicos dão a relevância a esta pesquisa e juntos constituem o objetivo geral:

- Padronizar o procedimento de laboratório para executar e avaliar os ensaios de sedimentação, compressibilidade e adensamento, aperfeiçoando a metodologia para a determinação dos parâmetros dos ensaios.
- Avaliar a influência de coagulantes (sulfatos) e floculante (catiônico) no processo de sedimentação dos rejeitos de fosfato estudados, mediante uma metodologia de incremento da quantidade de partes por milhão de coagulante e floculante para

seis teores de sólidos diferentes.

- Avaliar a influência de coagulantes (sulfatos) e floculante (catiônico) no processo de compressibilidade e adensamento dos rejeitos de fosfato estudados, mediante uma metodologia de incremento da quantidade de partes por milhão do coagulante e floculante para seis teores de sólidos diferentes.
- Realizar simulações numéricas de enchimento através das leis de compressibilidade obtidas experimentalmente, incluindo a utilização de uma análise por meio de um programa computacional, a partir dos parâmetros constitutivos extraídos dos ensaios HCT. Isto para conhecer seu comportamento nos tanques de disposição.

#### **1.4. ORGANIZAÇÃO DA TESE**

A presente tese foi estruturada em seis capítulos. O Capítulo 1 apresenta as considerações preliminares realizadas sobre ela, com apresentação dos propósitos que se pretende alcançar e os argumentos que fundamentam a pesquisa proposta, além do escopo da tese resultante.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre propriedades dos rejeitos finos de mineração, com uma abordagem sobre a natureza dos rejeitos de fosfato. Uma ampla e detalhada geologia é descrita, e os processos envolvidos na sedimentação e no adensamento desses materiais. São mencionadas também relevantes pesquisas anteriores.

O Capítulo 3 descreve os fenômenos de floculação e sedimentação de finos abrangendo uma revisão bibliográfica focada em estudo de casos, que possuem uma relevância na área da Geotecnia em mineração. Destacam-se a floculação do rejeito e a salinidade no processo de sedimentação.

O Capítulo 4 descreve o amplo programa experimental de laboratório e possui um detalhamento pormenorizado dos procedimentos normatizados utilizados, discorrendo sobre os equipamentos calibrados utilizados, as técnicas utilizadas e a apresentação dos resultados, além de já apresentarem as primeiras análises e discussões associadas aos resultados atingidos.

O Capítulo 5 apresenta uma metodologia de laboratório atualizada para executar os

ensaios de sedimentação, compressibilidade e adensamento, aprimorando o procedimento para a determinação dos parâmetros dos ensaios. As análises elaboradas e discussões dos resultados obtidos no capítulo anterior, como complementação ao já estabelecido nos capítulos de revisão bibliográfica. Os resultados obtidos foram confrontados com conjuntos de ideias de literaturas anteriores, tendo como informação base os resultados alcançados em ensaios de coluna e adensamento induzido por percolação.

O Capítulo 6 finalmente realça, para terminar a estrutura textual do presente estudo, as principais conclusões extraídas da pesquisa realizada e apresenta as sugestões para estudos futuros.

## CAPÍTULO 2

### PROPRIEDADES DOS REJEITOS FINOS DE FOSFATO ORIUNDOS DE UM DEPÓSITO SEDIMENTAR

#### 2.1. INTRODUÇÃO

A indústria de mineração de fosfato é uma das mais importantes do mundo, porém, muitos desafios estão sendo enfrentados atualmente na extração desse minério. As suas reservas globais estão diminuindo, prevê-se a exploração de antigos depósitos de rejeitos para extrair a apatita (Taha e Benzaazoua, 2019). Vários estudos sobre rejeitos de fosfato são feitos mundialmente, como os da Flórida, pois podem ser um risco ambiental e econômico. As opções de recuperação e restauração deles são muito limitadas e são fundamentalmente restritas por propriedades físicas ruins (Krekeler, 2008). A preservação das áreas de disposição só se pode conseguir com a reciclagem do rejeito de fosfato para aterro de pasta cimentada (Chen, 2017). Atualizar os teores de  $P_2O_5$  em rejeitos produzidos numa planta de fosfato, identificando as características mineralógicas e propriedades das partículas para entender melhor o comportamento da alimentação de flotação (Alsafasfeh e Alagha, 2017), do mesmo jeito, minerais contaminantes devem ser separados do fosfato devido a influência em suas propriedades (Zhang, 2019).

Um subproduto do processamento de minérios é denominado rejeitos de minas, dos quais os minerais foram extraídos com tamanhos de partículas de grãos muito finas, com alto teor de água e produtos químicos residuais necessários para extração de minério. O beneficiamento na mineração de fosfato gera uma quantidade considerável de rejeitos com uma granulometria fina. O processo industrial de extração e beneficiamento, nesse caso, a flotação, que é o principal método de concentração dos minerais de fosfato para a produção sustentável de fertilizantes fosfatados sendo importante o desempenho dos coletores, depressores e reagentes eficazes para flotação; estudos contínuos mostram a vanguarda das pesquisas na utilização de diferentes técnicas como a aplicação de nanobolhas ou espuma no processo metalúrgico (Hanna, 1975; Gruber, 1999; Gu *et al.*, 1999; El-Shall *et al.*, 2001; Sis e Chander, 2003, I, II; Hernainz, 2004; Huang, 2019).

## **2.2. COMPRESSIBILIDADE E ADENSAMENTO DOS REJEITOS FINOS**

### **2.2.1. Compressibilidade dos rejeitos finos**

Gibson *et al.* (1967) afirma que, a compressibilidade é um fator importante no dimensionamento dos depósitos de rejeitos, sendo seu comportamento geotécnico de muita relevância. A consolidação é governada pela teoria de grandes deformações, a limitação de pequenas deformações não é imposta, por outro lado, é considerada a variação da compressibilidade e a permeabilidade do solo durante o adensamento. Embora a Lei de Darcy seja considerada válida, ela é reformulada em uma forma na qual é a velocidade relativa do solo e do fluido intersticial que está relacionado ao gradiente de poropressão em excesso.

O adensamento de uma camada de materiais de granulometria fina cujas tensões efetivas são insignificantes em comparação com as aplicadas, mostra heterogeneidade, os efeitos temporais intrínsecos ao solo e a compressibilidade do fluido poroso. Os fundamentos da teoria clássica de Terzaghi não se aplicam ao processo de adensamento de materiais que sofram grandes deformações. As grandes deformações aparecem durante a consolidação formada com um alto índice de vazios durante o lançamento do material, então há a necessidade de uma metodologia apropriada.

O ensaio de Teste de Consolidação Hidráulica do inglês Hydraulic Consolidation Test (HCT), é realizado em laboratório com o uso de um equipamento sofisticado que permite obter as relações de compressibilidade e condutividade hidráulica, durante o procedimento se impõe uma vazão para induzir a consolidação da amostra, essa técnica utiliza uma bomba de fluxo possibilitando que os parâmetros característicos do material sejam obtidos, mostrando-se como uma método amigável ao uso das forças de percolação para induzir o adensamento.

De acordo com Stickland (2005), a compressibilidade de um conjunto de partículas é capaz de ter consequências nefastas no desempenho de operações de separação sólido-líquido, no caso de centrifugação, determina-se a força compressiva e, portanto, a concentração sólida do underflow (abaixo do valor mínimo). A permeabilidade é também dependente da concentração, sendo que a compressibilidade da rede afeta a taxa de desidratação.

### **2.2.2. Adensamento dos rejeitos finos**

Segundo Yan *et al.* (2019), os rejeitos com uma alta concentração de partículas finas precisam de enormes esforços. O desenvolvimento de novas tecnologias para acelerar a consolidação de lamas de rejeitos e as tecnologias de tratamento para rejeitos finos são muito limitadas e insuficientes. As propriedades hidrogeotécnicas e mineralógicas deles mostraram sempre ser um desafio para a segurança e para a economia. O empirismo e as pesquisas têm desenvolvido novos métodos de gerenciamento que melhoram a estabilidade física e química como o adensamento deles. Historicamente, a prática de bombeá-los para áreas de armazenamento circunscritas por diques feitos dos próprios rejeitos desde 1930, com abordagens convencionais para sua gestão (Bussi re, 2007).

Um dos desafios que tem a indústria mineradora nesta e nas próximas décadas é entender e prever os processos físicos e químicos dos rejeitos do processamento de minérios após a deposição da lama em instalações de armazenamento adequados. Em particular, o adensamento desses materiais apresenta uma instigação para fazer algo acima das capacidades tradicionais em quase todas as minas devido ao aumento da exploração e beneficiamento de mineral, e a sua disposição em depósitos controlados. O adensamento refere-se   diminuição do volume de rejeitos, que   atribuída à dissipacão da pressão excessiva dos poros,   descarga de água neles e ao aumento da tensão efetiva. Assim, rejeitos de mineração de granulometria fina com baixa condutividade hidráulica, podem produzir grandes reduções de volume e longos períodos para conclusão da consolidação (Agapito e Bareither, 2018).

As primeiras pesquisas referentes a materiais de granulometria fina, como rejeitos finos de mineração, na atualidade denominados geomateriais, apresentaram equações para adensamento unidimensional de grandes extensões que sofrem consideráveis deformações volumétricas, que não podem ser avaliados com base na teoria clássica de Terzaghi. Esses modelos desenvolvidos tentam representar as mudanças na compressibilidade do solo e na condutividade hidráulica durante a deformação. Assim se pode destacar a teoria do adensamento com deformações finitas, que é aplicada na atualidade aos estudos de adensamento dos rejeitos de granulometria fina, com uma abordagem na restrição das deformações assumidas na teoria de adensamento de Terzaghi (Gibson *et al.*, 1967).

Recentes estudos sobre rejeitos de minas objetivam avaliar a aplicabilidade de modelos de adensamento com variáveis como a deformação grande unidimensional (1D) de grande porte para prever o adensamento em uma instalação de armazenamento de rejeitos em grande escala TSF (do inglês Tailings Storage Facility), ou a utilização de múltiplos satélites de radar InSAR (do inglês Interferometric Synthetic Aperture Radar), fornecendo uma visão espacial completa da taxa de adensamento em precisão de escala milimétrica com atualizações quinzenais ou mensais, pois o monitoramento da estabilidade da instalação de rejeitos é, portanto, indispensável para o desenvolvimento de mineração sustentável. Estudos mais ousados tentam descobrir os efeitos do congelamento-degelo sobre rejeitos finos maduros MFT (do inglês Mature Fine Tailings) que mostraram a efetividade para reduzir a taxa de vazios inicial e a compressibilidade da MFT não tratada e alterada (Agapito e Bareither, 2018; Hu *et al*, 2017; Proskin *et al*, 2010).

### ***Sistemas de coordenadas Lagrangeano e Euleriano***

Lumley (1969) concluiu que assinalar os pontos materiais como um fluxo usando suas localizações no tempo de referência e, em seguida, fornecer seus deslocamentos, velocidades e acelerações como funções de tempo e posições iniciais, denominado Descrição Lagrangeana, ou seja, uma função do tempo ao longo de sua trajetória. Já na Descrição Euleriana, pode-se escolher arbitrariamente um sistema de coordenadas de "laboratório", e avaliar para encontrar o deslocamento, velocidade e aceleração nos pontos fixados naquele sistema, ou seja, funções da posição (normalmente uma posição fixa) e do tempo.

Em muitos problemas, as estruturas eulerianas são matematicamente muito mais convenientes, de modo que quase sempre escrevemos as equações de conservação para um continuum (modelo contínuo espaço-tempo), nesse sistema. Para expressar em variáveis de Campo de Euler a experiência de mudança por um ponto de material em movimento, devemos levar em conta não apenas a mudança com o tempo das propriedades em um ponto fixo, mas também a mudança de propriedades com posição em um tempo fixo (Figura 2.1).



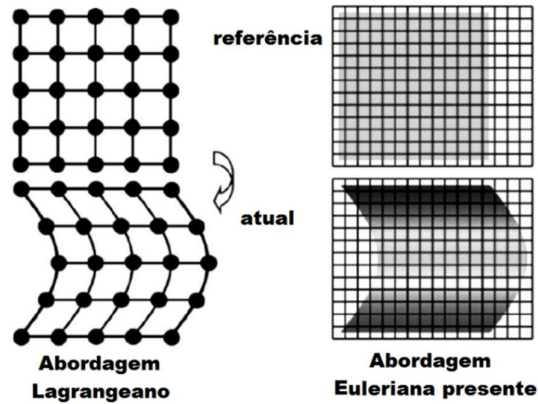


Figura 2.1 - Esquema representativo de pontos em um fluido nos sistemas lagrangeano e euleriano (Adaptado de Takagi *et al.*, 2011)

### ***Teoria do adensamento das grandes deformações***

- Terzaghi e Fröhlich (1936), apresentaram uma teoria para adensamentos de solos finos com as premissas de uma geometria estável (pequenas deformações), linearidade no modo de se comportar o solo, ausência desse processo com referência ao peso próprio do material e carregamento constante com o passar do tempo. Nesse sentido, Mikasa (1963) e Gibson *et al.*, (1967) levaram em conta isso e desenvolveram uma teoria de adensamento a grandes deformações que admite a não linearidade física do material, a geometria é considerada o adensamento em virtude do peso próprio. Essa teoria é geralmente utilizada para estudos de adensamento de rejeitos finos, pois é vista como a melhor alternativa para fazer a descrição de uma maneira mais apropriada.
- Segundo Gibson e Schiffman (1985), existem quatro procedimentos numéricos que podem ser aplicados à equação governante para a consolidação de deformação finita não-linear bidimensional, da seguinte maneira:
- Primeiro, um procedimento explícito de diferenças finitas pode ser desenvolvido, as derivadas espaciais podem ser expandidas em termos de diferenças centralizadas, no tempo  $t$ . A derivada de tempo pode ser expandida como uma diferença direta, isso resultará em uma equação de diferença explícita. O procedimento de marcha deve ser usado para estabilidade. No entanto, a estabilidade é necessária para cada uma das duas dimensões  $\Delta a$  e  $\Delta b$  e o incremento de tempo  $\Delta t$ , que atende ao critério de estabilidade para o problema bidimensional em cada etapa de tempo.

- O segundo procedimento é implícito, as derivadas espaciais são expandidas em termos de diferenças centralizadas no tempo ( $t + \Delta t$ ). Esse procedimento pretende estabelecer equações simultâneas para as quais um procedimento implícito de direção alternada pode ser viável. No entanto, o critério de estabilidade para formulações implícitas não é estabelecido.
- O terceiro procedimento sugerido é uma variação do método das linhas descritas anteriormente. O sistema de equações diferenciais ordinárias da forma é obtido na equação 2.6. O unidimensional resulta em equações diferenciais ordinárias, esse problema bidimensional resulta em equações diferenciais ordinárias. Essas equações podem ser resolvidas pelas mesmas técnicas para a formulação unidimensional, este método é sempre estável.

$$\frac{\partial e_{ij}}{\partial t} = f(t, e_{ij}); \quad i = 1, 2, \dots, m \quad j = 1, 2, \dots, n \quad 2.6$$

Um quarto método possível se aplicaria às variáveis espaciais com um esquema de marcha temporal explícito. Essa abordagem tem a desvantagem de um princípio variacional para isso, e uma classe de problemas deve ser estabelecida a priori.

Nota-se que a Equação 2.7 é simplificada pelas Equações 2.8 e 2.9:

$$\frac{\partial}{\partial a} \left[ C_F \frac{\partial e}{\partial a} \right] + \frac{\partial}{\partial b} \left[ C_F \left( \frac{1+e}{1+e_0} \right)^2 \frac{\partial e}{\partial b} \right] - (G_s - 1) \frac{d}{de} \left[ k \left( \frac{1+e_0}{1+e} \right) \right] \frac{\partial e}{\partial a} + \frac{\partial}{\partial b} \left[ \frac{k}{\rho_f} (1+e) \frac{\partial \sigma}{\partial b} \right] = \frac{\partial e}{\partial t} \quad 2.7$$

Onde:

$$a = \xi(a, b, 0); \quad b = n(a, b, 0); \quad e_0 = e(a, b, 0)$$

$$C_F = - \frac{k}{\rho_f} \frac{(1+e_0)^2}{(1+e)} \frac{d\sigma'}{de} \quad 2.8$$

$$G_s = \frac{\rho_s}{\rho_f} \quad 2.9$$

Onde:

$C_F$  = Coeficiente de consolidação finita  
 $k$  = parâmetros relacionado ao índice de vazios  
 $e_0$  = índice de vazios inicial  
 $e$  = índice de vazios  
 $\sigma'$  = tensão efetiva vertical

N = porosidade

$\rho_s$  = massa específica do solo

$\rho_f$  = massa específica do fluido

Contém um termo integral da Equação 2.10:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial b} = -\rho_f \int_0^a \frac{\partial}{\partial b} \left( \frac{1+e}{1+e_0} \right) da + (\rho_s - \rho_f) \left[ \frac{1}{1+e_0(a_0, b, t)} \frac{da_0}{db} + \int_a^{a_0} \frac{\partial}{\partial b} \left( \frac{1}{1+e_0} \right) da \right] \quad 2.10$$

Os autores afirmaram que isso pode ser discretizado por meio da Regra de Simpson (Equação 2.11). O algoritmo de solução sugerido é o seguinte:

Dado o problema de valor limite em termos da taxa de vazios, uma solução é desenvolvida para e (a, b, t).

- A tensão efetiva vertical  $\sigma^{'}$  (a,b,t) é determinada a partir da relação de tensão efetiva da razão de vazios que é conhecida a priori.
- A tensão total vertical  $\sigma(a,b,t)$  é determinada a partir da relação de equilíbrio em massa.

$$\frac{\partial \sigma}{\partial a} + [n\rho_w + (1-n)\rho_s] \left[ \frac{1+e}{1+e_0} \right] = 0 \quad 2.11$$

A poropressão estática  $u_0(a, b, t)$  é determinada pela integração da relação de equilíbrio fluido, na Equação 2.12, onde  $\rho_w$  é a massa específica da água.

$$\frac{\partial u_0}{\partial a} + \frac{1+e}{1+e_0} \rho_w = 0 \quad 2.12$$

Nota-se que esse é um nível constante de altura acima da base da camada de argila. A consideração de uma superfície de água livre variável é uma extensão trivial para esse algoritmo. Cada estação no momento de interesse é convertida para a estação apropriada, mostrado na Equação 2.13.

$$\xi(a, b, t) = \int_0^a \frac{1+e(a', b, t)}{1+e(a', b, 0)} da' \quad 2.13$$

### **2.2.3. Ensaios de laboratório aplicados aos rejeitos finos**

Os rejeitos de fosfato são gerenciados adequadamente, porém para melhorar as tecnologias de disposição, as propriedades geotécnicas dos rejeitos são avaliadas, os dados obtidos da investigação de laboratório são as propriedades geotécnicas derivadas desses testes e são, então, apresentadas e fornecem o sustento para aplicar uma padronização da metodologia para ensaios de rejeitos de baixa densidade. Embora os depósitos sejam muito difíceis de amostrar e, às vezes, é quase impossível obter amostras não perturbadas e, por isso, é necessário preparar amostras em laboratório usando técnicas que simulem as condições de campo.

Importantes estudos com ênfase em ensaios de laboratório foram realizados, tais como de coluna de sedimentação com diversas dimensões (Been e Sills, 1981; El-Shall e Bogan, 1992; Zhao I, II, 2004; Ramos 2013; Asensi *et al.*; 2019), e procedimentos voltados para o estudo da permeabilidade e adensamento. Ensaios de adensamento hidráulico de tipo célula edométrica (HCT do inglês *Hydraulic Consolidation Test*) para consolidação das lamas (Imai, 1979; Huerta *et al.*, 1988; Abu-Hejleh *et al.*, 1996).

#### ***Ensaios de coluna de sedimentação***

Muitos métodos de projeto de tanques de decantação são baseados na experiência adquirida em projetos anteriores, em modelos para simular tanques de sedimentação calculando a velocidade de sedimentação a partir de valores padrão ou usando fórmulas empíricas obtidas na prática. Na indústria de mineração, a magnitude da sedimentação da lama pode ser mudada pela presença de coagulantes ou floculantes usados em um processo físico-químico anterior. Porém, para avaliar a qualidade das lamas, pode ser realizado no laboratório um simples teste de sedimentação. Uma quantidade definida de água contendo lama pode ser colocada em uma proveta e deve-se mensurar a taxa de sedimentação em função do tempo.

O tempo começa a ser contabilizado após agitação do rejeito (lama e líquido), a posição inicial dela coincide com a graduação de 1000 ml. Enquanto a lama estabelece a separação entre o líquido claro, ela é acompanhada na graduação da proveta. É importante manejá-la com um teor de sólidos elevado, considerando que melhora o espaço de armazenamento

do tanque garantindo uma melhor economia, ou para fornecer um período de integração mais longo para os sólidos, economizar capacidade de bombeamento e para reduzir as exigências de outros tipos de tratamento da lama.

Segundo Been e Sills (1981), as características da lama podem ser observadas em ensaios, permitindo que elas sejam usadas para prever a consolidação em laboratório. Esses experimentos de laboratório sobre o desenvolvimento e a consolidação de solos moles são realizados pelo ensaio de colunas de sedimentação, com medição de densidade, poropressão e adensamento, essa última característica causada pelo peso próprio do solo e, enquanto o sedimento de baixa densidade, é acompanhado por grandes deformações. Os autores realizaram ensaios em colunas de acrílico de 2 metros de altura e usaram uma técnica de raios-X precisa e não destrutiva para obter os índices de vazios e das poropressões tornou possível a determinação das tensões efetivas.

Para El-Shall e Bogan (1992), o processo de sedimentação é usado para espessar as lamas ou para clarificar os efluentes. O ciclo de sedimentação de uma suspensão é desenhado como uma curva de sedimentação que está regida pela relação da altura de interface (entre a suspensão estabilizada e o líquido claro) versus tempo. A interface entre a precipitação e a suspensão é denominada linha de lama. Também é possível distinguir no fundo da proveta uma camada de lama que representa os sólidos que se assentaram da suspensão e a interface entre ela e a suspensão é chamada de linha de lama tratada (espessa e viscosa). Para realizar a curva de sedimentação deve-se plotar os dados obtidos nas leituras referenciadas a vários períodos determinados ao longo do processo de sedimentação em relação a parâmetros como a altura ou teor de sólidos, a função resultante é denominada curva de taxa de sedimentação (Figura 2.2).

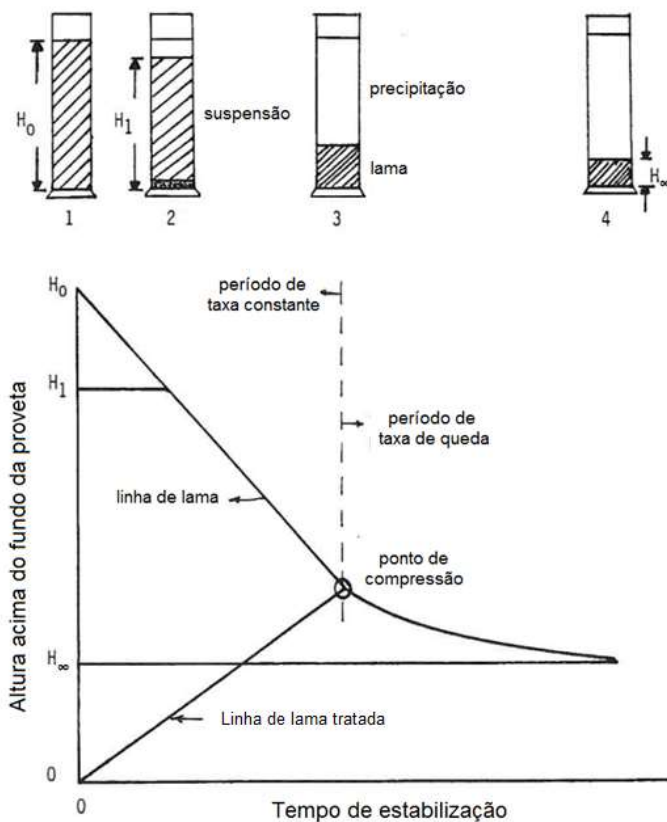


Figura 2.2 - Ciclo de sedimentação de uma suspensão  
(Adaptado de El-Shall e Bogan, 1992)

Zhao (I, II; 2004) descreve o processo de aceleração com lama floculada com sulfato de alumínio e com um polímero orgânico. O autor observou que a aceleração dela foi menor na faixa excedente do floculante ( $>10 \text{ mg/l}$ ) devido a sua sedimentação, que foi controlada pela formação de uma rede estrutural cercada pelo excesso de floculante, essa estrutura em rede liga os flocos e parece causar um regime de empacotamento. Enquanto na faixa abaixo da dose do polímero ( $<10 \text{ mg/l}$ ) a aceleração é maior, o aumento da velocidade de sedimentação pode ser devido à floculação do lodo durante a sedimentação; na faixa abaixo da dose do polímero, a sedimentação do lodo foi controlada pela formação de grandes flocos e pela diminuição progressiva da viscosidade. Enquanto na faixa de overdose do polímero ( $> 10 \text{ mg / l}$ ) a sedimentação do lodo foi controlada pela formação de uma estrutura de lodo em rede cercada por um excesso de polímero. A base do procedimento do teste de sedimentação estático é mostrada esquematicamente na Figura 2.3.

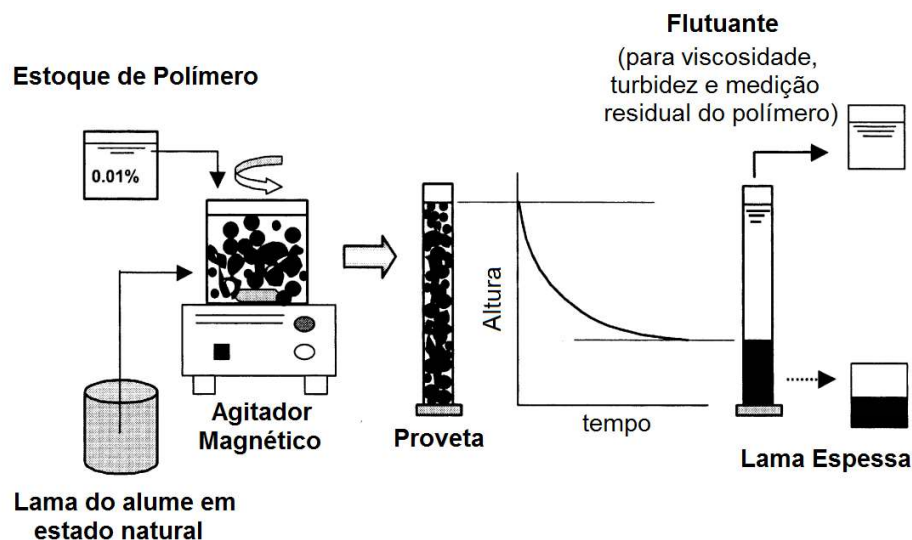


Figura 2.3 - Metodologia esquemática do teste de sedimentação de zona estática (Adaptado de Zhao I, 2004)

Ramos (2013) assevera que, ensaios de coluna de sedimentação foram realizados com provetas que possuíam uma altura de 2,6 m e 0,11m de diâmetro interno com um volume de cerca de 21 litros de capacidade. Objetivando estudar o efeito da salinidade na velocidade de queda dos sedimentos finos e verificar se trata de um fator que se deve considerar nas medidas de mitigação. O autor comprovou que o incremento do nível de salinidade no líquido eleva as características coesivas da lama de uma bacia portuária, aumentando a velocidade de sedimentação. Também se destaca que o efeito da salinidade sobre a velocidade de queda de sedimentos finos, a água salgada encontra-se presentes íons eletropositivos fortes de sódio,  $\text{Na}^+$ .

Asensi *et al.* (2019) afirma que é importante avaliar a necessidade de uma rápida agitação inicial da lama para reproduzir as curvas de sedimentação e eliminar o efeito de memória da lama, essa agitação inicial rápida dela permite reproduzir as condições hidrodinâmicas do depósito de disposição (Figura 2.4). Os autores utilizaram duas provetas para o ensaio de coluna de sedimentação com altura de 110 cm e com diâmetro de 12 cm. A altura da interface no teste de sedimentação foi determinada em função do tempo no final da fase de agitação, evitando algum tipo de interferência com o possível processo de agregação dos flocos, ou com o colapso da estrutura inicial do lodo causando a etapa de aceleração. Para considerar o efeito dos reagentes químicos utilizados no campo, foram realizados dois conjuntos de testes de sedimentação com diferentes composições da suspensão.

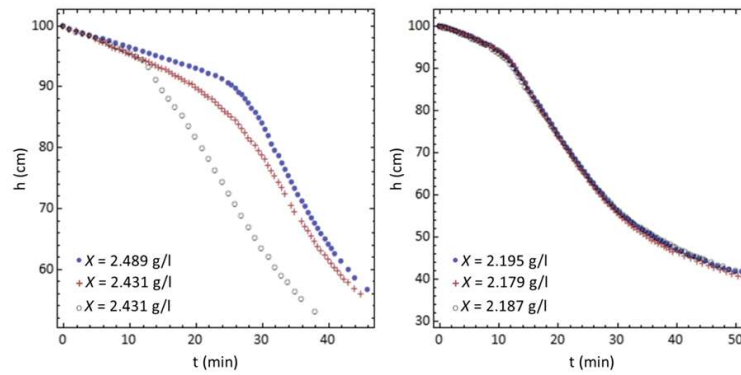


Figura 2.4 - Resultados de testes de sedimentação. (A) Sem agitação prévia. (B) Com 10 min de agitação anterior (Asensi *et al.*, 2019)

A Figura 2.5 mostra a relação entre a velocidade e a quantidade em gramas dos reagentes químicos utilizados no volume de água, também apresenta um gráfico de dispersão referido a energia cinética do material, que é igual em magnitude à sua energia potencial em um campo gravitacional, ou seja, a velocidade residual ( $V_i$ ). O experimento A, com uma diluição da lama com suspensão do clarificador secundário e no experimento B com suspensão diluída para 75%; nas curvas foram observados os três estágios como a típica interface de sedimentação entre o lodo e a suspensão.

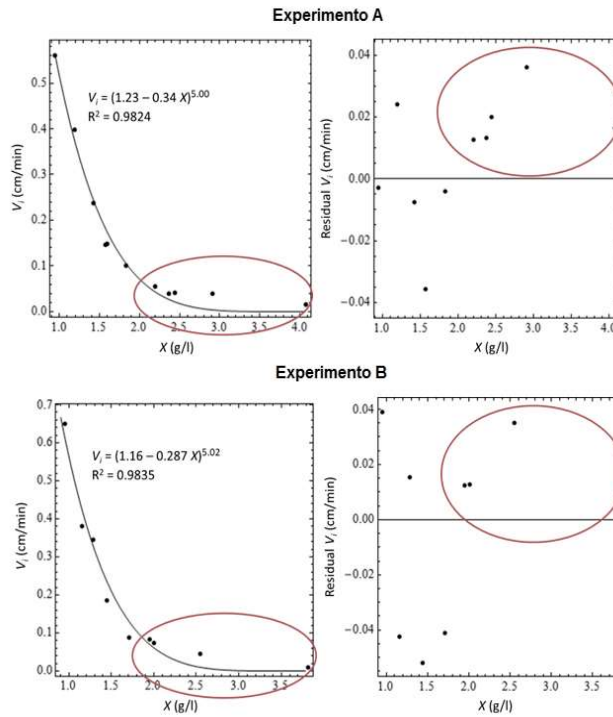


Figura 2.5 - Resultados de regressões iniciais de velocidade de sedimentação e resíduos do modelo de Richardson e Zak (Asensi *et al.*, 2019)



### ***Ensaio de adensamento induzido por percolação (HCT)***

Baseado no Princípio de adensamento, governado pelas forças de percolação, está fundamentado por uma vazão, para induzir a consolidação determinando os parâmetros de compressibilidade e condutividade hidráulica, utilizando uma bomba de fluxo que permite o controle das correntes aplicadas ao corpo de prova submetido ao fluxo induzido, também a etapa de permeabilidade pode ser realizada pelo uso dessa bomba durante a etapa de carregamento na amostra causando como consequência o adensamento por carregamento. Esse método mostra-se apropriado para estabelecer as relações constitutivas desses materiais e é mais amigável quando comparado com os procedimentos tradicionais limitantes.

Soluções numéricas são aplicadas para resolver as questões sobre o problema dependente do tempo relacionado aos resultados do adensamento induzido por percolação. Os softwares desenvolvidos para reproduzir os valores resultantes dos ensaios abrangem equações diferenciais parciais não lineares, levando um tempo reduzido pelo uso de computadores. Trabalhos pioneiros que foram fortalecendo essa teoria sobre o adensamento a grandes deformações foram revisados como literatura técnica e são indicados para uma análise do modelo deposicional de materiais finos sob deformações finitas, padronizada após o trabalho inicial de Gibson *et al.* (1967), adaptações e modificações descritas por Monte e Krizek (1976), Somogyi (1979), Schiffman (1980), Gibson *et al.* (1981), Znidarcic (1982), Schiffman *et al.* (1984) e outros.

De acordo com Imai (1979), as versões clássicas dos ensaios de adensamento não atingiam os objetivos de alguns solos, então com a finalidade de prever as constantes de consolidação de sedimentos a serem formados hidraulicamente em um depósito por materiais finos, foi desenvolvido pelo autor um teste aplicando a força de percolação em uma amostra preparada por sedimentação em um aparelho capaz de medir o adensamento. O princípio de que a força de percolação é convertida em tensão de adensamento (com valores de 0,1 kPa até 50 kPa), e é mostrado que todas as constantes de adensamento e a curva de compressão também podem ser determinadas executando três medidas no estado de fluxo estável de infiltração realizado após a conclusão da consolidação; primeiro a distribuição de poropressões, depois o conteúdo de água dentro da amostra, e por último a velocidade do fluxo passando através da amostra.

Para Huerta *et al.* (1988), o problema da consolidação induzida por percolação em lamias sedimentadas ou argilas muito moles necessita de um modelo matemático, os autores desenvolveram um modelo unidimensional baseado na teoria dos limites finitos, com relações de propriedade do material para determinar a espessura final de um sedimento macio, o qual o algoritmo de solução inversa é adotado. O modelo resultante mostra que o coeficiente de permeabilidade influencia tanto o tempo para atingir a condição de estado estacionário quanto à natureza da própria condição desse estado (isto é, a altura final do depósito consolidado depende da variação de permeabilidade com relação de vazios). Os autores apresentaram dados de uma série de testes em uma suspensão de caulinita que foram usados para estabelecer relações de propriedade de material que foram então usadas para prever a resposta de outros testes no mesmo solo sob condições diferentes. A Figura 2.6 mostra esses dois casos em  $t = 0$ .

Os problemas são distinguidos por sua condição de contorno na parte inferior (ou seja,  $z = z_0$ , onde  $z_0$  é a profundidade do depósito em coordenadas de material), que são dadas respectivamente por:

$$u_{(z_0)} = 0 \text{ (Totalmente drenado)}$$

$$u_{(z_0)} = u_0 \text{ (Piezométrico principal)}$$

Onde  $u_0$  é a diferença entre os lençóis freáticos inferiores e superiores.

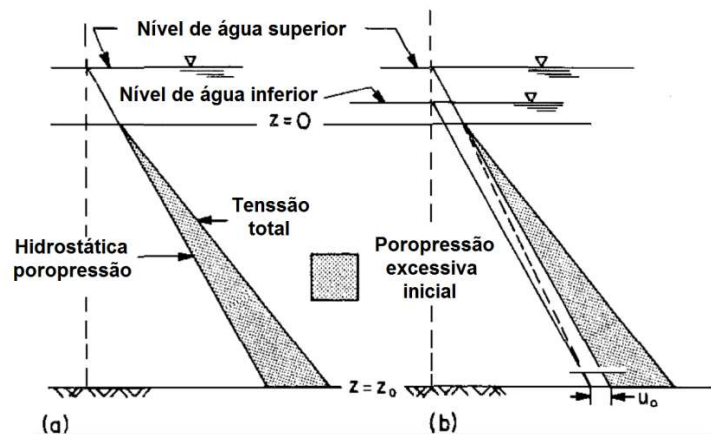


Figura 2.6 - Condições iniciais: (a) Caso totalmente drenado; b) Caso piezométrico principal (Adaptado de Huerta *et al.*, 1988)

Conforme Abu-Hejleh *et al.* (1996), o teste e as análises de consolidação induzida por percolação (SICT do inglês Seepage Induced Consolidation Test) fornecem um método racional para a determinação das relações constitutivas de consolidação de argilas fosfáticas moles e outros materiais finos. Uma forte avaliação foi desenvolvida pelos

autores em relação entre vazios e tensões efetivas e a relação entre vazios e permeabilidade para vários tipos do material avaliado. Os dados laboratoriais do teste de fluxo restrito e do de consolidação por percolação transitória e as medições de campo em três tanques de decantação de argila fosfática confirmam os resultados obtidos com os testes e análises de consolidação induzidos por percolação. A qualidade dos resultados obtidos foi verificada pela comparação com três tipos de medições independentes, incluindo os dados de campo.

A Figura 2.7 mostra um diagrama esquemático do aparato experimental, a unidade de célula contém um anel de amostra transparente para alojá-la, um pistão de plástico e um assento inferior que são equipados com uma pedra porosa, um eixo de carregamento e um calibrador para medir a altura dessa amostra. O painel de controle de pressão tem uma dupla finalidade: aplicar a contrapressão necessária e controlar a pressão do ar no cilindro de ar para carregar a amostra no teste de carga em etapas. Duas válvulas abaixo do assento inferior conectam a água dos poros no fundo dela à bomba de fluxo e ao transdutor, o uso dessa bomba facilita o controle preciso da vazão através da amostra. A diferença de pressão sobre o experimento é medida com o transdutor diferencial de pressão de precisão conectado a um sistema de aquisição de dados baseado em computador para coletar os dados das mudanças de pressão com o tempo (Abu-Hejleh *et al.*, 1996).

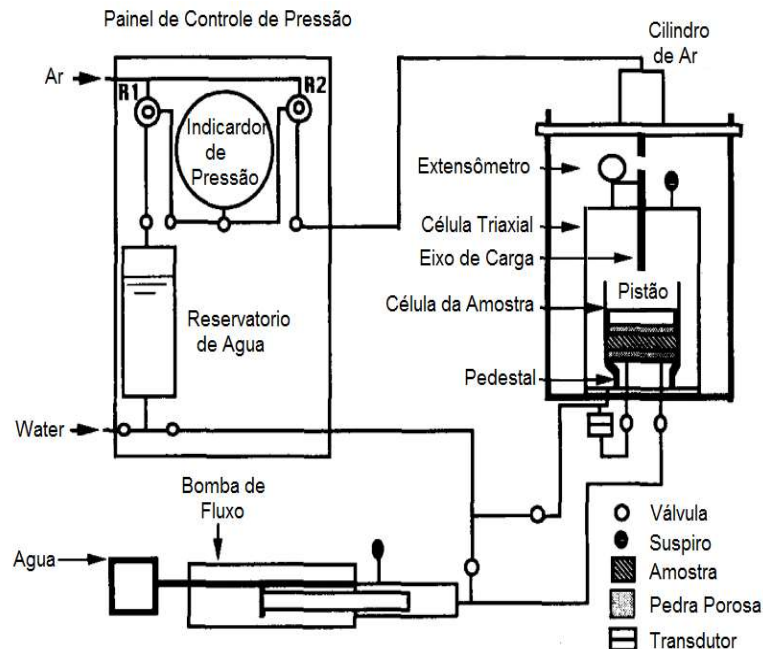


Figura 2.7 - Esquema de ensaio HCT (Adaptado de Abu-Hejleh *et al.*, 1996)

Uma taxa de fluxo constante é imposta ao longo da amostra, retirando a água do fundo dela usando essa bomba. Devido a corrente descendente da água, a amostra se consolida e a diferença de pressão resultante sobre ela aumenta com o tempo, e é registrada pelo sistema de aquisição com ajuda de um transdutor de pressão de dados que realiza uma medida constante (Figura 2.8). A mesma taxa de fluxo é mantida até que a condição de estado estacionário seja alcançada, onde nenhuma consolidação adicional ocorre e a diferença de pressão na amostra, torna-se constante (Abu-Hejleh *et al.*, 1996).

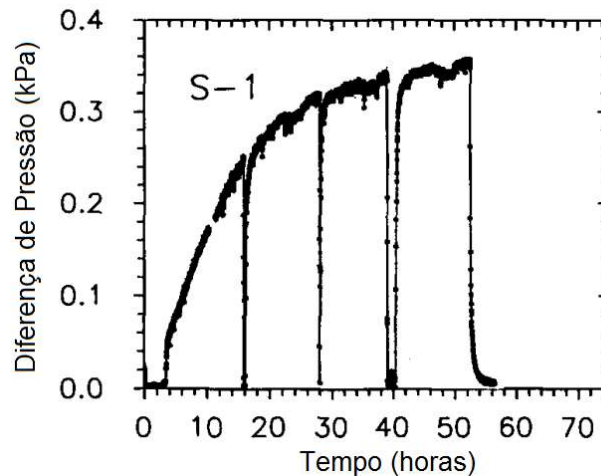


Figura 2.8 - Resultados experimentais do teste de consolidação induzida por infiltração (Abu-Hejleh *et al.*, 1996)

## 2.3. MINÉRIO FOSFATO

### 2.3.1 Depósitos de rocha fosfática

De acordo com McConnell (1938), estudos baseados em diagramas de raios X nas amostras de rocha fosfática tornaram possível obter alguns novos dados químicos. As propriedades relatadas para várias amostras sintéticas proporcionaram características básicas, e várias delas também se mostraram pouco relacionadas com os dados sobre materiais naturais. O autor realizou substituições por cálcio, por fósforo, por flúor e por oxigênio; sendo que a estrutura da rocha fosfática parece ser notavelmente estável, permitindo vários tipos de substituição bastante incomuns e envolvendo um considerável número de íons, vários íons diferentes aparentemente substituem cada um dos quatro íons de fluorapatita.

Para UNIDO e IFDC (1998), a rocha fosfática pode ser encontrada em dois tipos principais de depósitos sedimentares e ígneas. Uma descrição geológica do depósito ígneo pode ser enunciada que são frequentemente associados a intrusões de carbonatitos e/ou alcalinos (deficientes em sílica). Já as rochas sedimentares de fosfato ocorrem ao longo da escala de tempo geológico, a maioria dos depósitos foi aparentemente formada em condições marítimas ao longo da costa e em plataformas continentais.

A forma física por apresentar variações consideráveis além de possuir uma composição química muito grande, sendo que o depósito para ser explorado deve apresentar um mínimo de deformação estrutural, um ou mais leitos espessos de alta qualidade que são inconsolidados e têm uma textura e composição granular uniforme e finalmente uma sobrecarga superficial.

Segundo FAO (2004), os depósitos ocorrem em formações de idades geológicas muito variadas, frequentemente ocorrem como camadas espessas relativamente planas, e podem estar por baixo da sobrecarga superficial. Os depósitos que respondem pela maior parte da produção mundial de rocha fosfática estão no Marrocos e em outros países africanos, nos Estados Unidos da América, no Oriente Próximo e na China. As francolitas com alto teor de carbonato para a substituição de fosfato são os mais altamente reativos e são os mais adequados para aplicação direta como fertilizantes ou corretivos para o solo.

Segundo UNIDO e IFDC (1998), as rochas de fosfato sedimentares podem variar de materiais inconsolidados soltos até materiais fracamente cimentados ou rochas altamente endurecidas. Em geral, as rochas de fosfato sedimentares mais jovens que não foram submetidas a enterramentos profundos e que contêm quantidades significativas de partículas de fosfato, areia e argilas tendem a ter idades variadas, foram depositadas simultaneamente com carbonatos. A Tabela 2.1 apresenta as variedades do mineral, pertencente ao grupo dos fosfatos, com as suas variantes, assim nomeados por razão de altas concentrações de íons Hidróxido ( $\text{OH}^-$ ), Fluoreto ( $\text{F}^-$ ), e Cloreto ( $\text{Cl}^-$ ).

Tabela 2.1 – Variedades de Apatita e Propriedades Cristalográficas e Ópticas Seleccionadas

Variedade	Fórmula	Valor de célula unitária (Å)	Índice de refração (ND 25)
Francolita	$\text{Ca}_{10-x-y}\text{Na}_x\text{Mg}_y(\text{PO}_4)_6\text{Z}(\text{CO}_3)_z\text{F}_{2-0.4z}$	9,320-9,369	1,595-1,633
Fancolitab	$\text{Ca}_{10-a-b}\text{Na}_a\text{Mg}_b(\text{PO}_4)_6\text{Z}(\text{CO}_3)_c\text{F}_{2-0.185c}$	9,318-9,369	1,597-1,633
Carbonato-hidroxiapatita	$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{CO}_3)_2\text{OH}_2$	9,420	1,630
Fluorapatita	$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$	9,370	1,629-1,633
Hidroxiapatita	$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{OH}_2$	9,420	1,651
Clorapatita	$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{Cl}_2$	9,640	1,667

FAO (2004) diz que, os produtos de intemperismo de apatitas ígneas e sedimentares (minerais de ferro e alumínio) geralmente tem pouco valor econômico, quanto maior o teor de fosfato ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ), maior o potencial econômico da rocha. Alguns elementos na conversão química da rocha fosfatada para ter valor econômico como a presença de carbonatos livres, ferro, alumínio, magnésio e cloreto são fatores importantes, porém, quando a rocha é usada para aplicação direta, frequentemente esses fatores perdem a sua importância. A Figura 2.9 mostra um mapa dos depósitos de rocha fosfatada atualmente sendo minerados, aqueles que foram extraídos no passado recente e aqueles que se mostraram potencialmente econômicos.

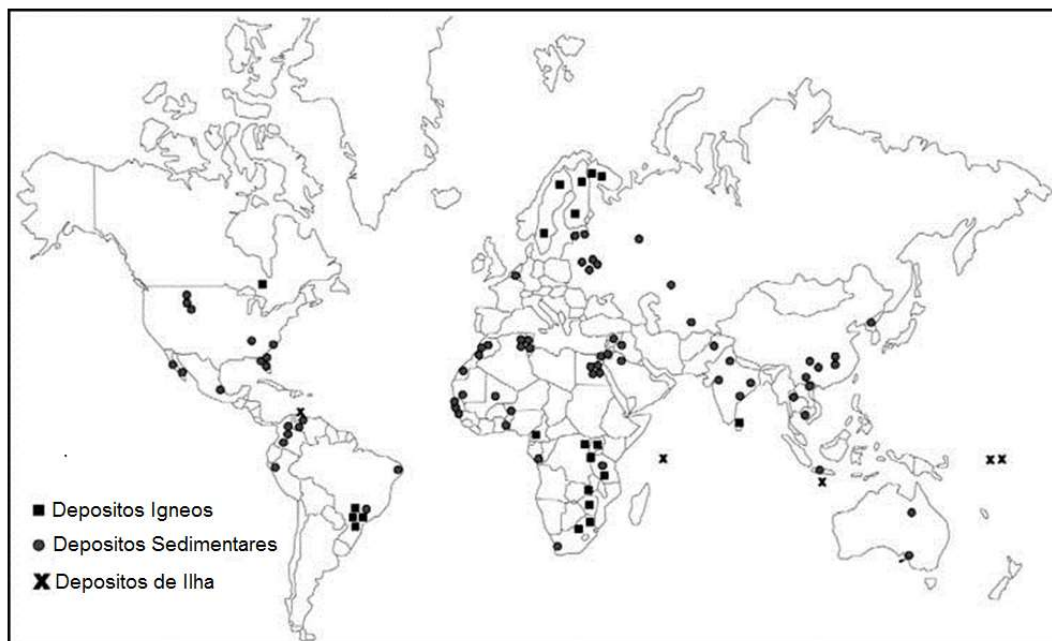


Figura 2.9 - Distribuição mundial por tipo de depósito das reservas de fosfato (FAO, 2004)

Focus Ventures (2015) afirma que, o fósforo encontra-se de forma significativa na rocha fosfática, que aparece na forma de pentóxido de fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ), utilizado como medida

básica dos fertilizantes fosfatados, e a formação geológica do depósito depende então da composição química e física da rocha e esses depósitos de rocha fosfática foram estudados e classificados em depósitos ígneos (com 20% presentes em carbonatitos e pegmatitos) com teores entre 4 e 15% e poucos contaminantes; ou ambientes sedimentares marinhos (com 80% formados pela deposição de conchas e fósseis marinhos e pela precipitação de francolita por fosfogênese e transformação) com teores entre 10 e 30%, com possíveis contaminantes de Urânio ( $U_2O_3$ ) e Cádmio (Cd).

Tassinari (2011) versa que as reservas sul-americanas estão principalmente no Brasil e no Peru (97%). No Peru, a rocha fosfática de Bayóvar no deserto de Sechura, é do tipo sedimentar marinho, sendo o mineral de fosfato do tipo hidroxiapatita, possuindo qualidades como um alto teor do mineral, uma alta solubilidade e um baixo nível de impurezas. Esse depósito tem 84% de apatita, 12% de feldspatos, 4 % de quartzo, com traços de mica, anfíbólio e carbonatos. Teores médios de  $P_2O_5$  de 23,6% e  $SiO_2$  de 16%, possui partículas com um grau de liberação maior que 90% na granulometria (-800  $\mu m$ ).

### **2.3.2. Depósitos de fosfato de Sechura**

O material estudado é oriundo da costa do norte do Peru, do deserto de Sechura que possui uma precipitação inorgânica de apatita como sedimentos anóxicos, e subsequente concentração de apatita por processos físicos. A oxidação de materiais orgânicos (principalmente diatomáceas, típicas de águas frias como o mar peruano) durante a redução de  $SO_4^{2-}$  é a principal fonte de fosfato dissolvido. A precipitação de apatita é favorecida dentro dos sedimentos pela alta concentração de fosfato nas águas intersticiais, pela disponibilidade de locais de nucleação adequados e por reações diagenéticas que removem íons de  $Mg^{2+}$  interferentes das soluções de poros.

A concentração de apatita em nódulos de fosfato endurecidos é provocada por processos de sedimentação e estruturação, possivelmente em resposta a uma mudança no ambiente sedimentar causada por flutuações no nível do mar eustático ou tectonismo (Veeh *et al.*, 1973; Burnett, 1977; Burnett *et al.*, 1980, 1988; Burnett e Kim, 1986; Baker e Burnett, 1988; Froelich *et al.*, 1988).

Para McDonald (1956), a plataforma da costa do Peru no deserto de Sechura (Figura 2.13), encontra-se as formações Montera do Mioceno Inferior com finos arenitos marinhos e Zapallal do Mioceno Médio com argila marinha (argilas e folhelhos de diatomita-fosfato com presença de arenitos calcários). Esses sedimentos considerados da idade miocênica, quarta época da era geológica Cenozóica, encontram-se em camadas e são os mais amplamente distribuídos de todos os sedimentos terciários depositados na área do deserto e alcançam 1.184 m de espessura.

De acordo com Fassbender (1967), o depósito de fosfato de Sechura descoberto em 1955 no norte do Peru (Figura 2.10), aumentou as reservas naturais de fosfatos em Sudamérica, estima-se que existam 593 milhões de toneladas de fosfato com um teor médio de 31% de  $P_2O_5$ . A espessura das camadas de fosfato varia de 0,3 a 2,0 e a concentração de  $P_2O_5$  de 1,5 a 25%, com uma concentração de flúor de 2,11%, porém as camadas são principalmente massivas, mas friáveis, sem estratificação aparente, e seu potencial para o efeito do fosfato aumenta diminuindo o tamanho das partículas.

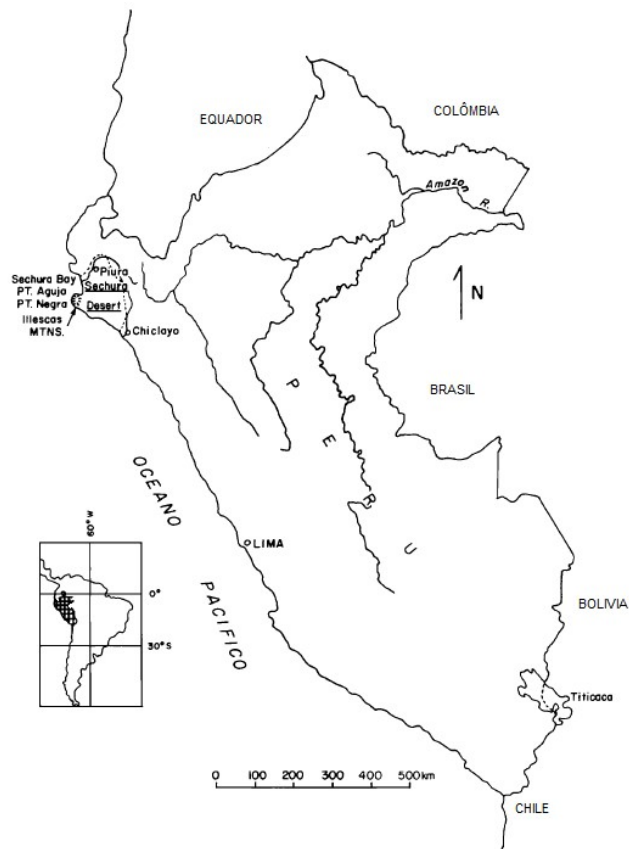


Figura 2.10 - Depósito de fosfato em Sechura (Fassbender, 1967)



Conforme Veeh *et al.* (1973), depósitos no fundo do mar foram mostrados por datação radiométrica como geologicamente recentes, esses depósitos formados por nódulos de fosforito que ocorrem ao longo da margem continental biologicamente produtiva do Peru, foram datados por métodos de série de urânio, relógio nuclear comumente usados na geologia. As idades radiométricas variam do Pleistoceno tardio ao recente, época do período Quaternário da era Cenozóica do éon Fanerozóico, indicando que as fosforidades estão se formando atualmente nessa área.

Manheim *et al.* (1975) assevera que, a plataforma da costa peruana mostra sedimentos com características altas de maciez, uma coloração verde, ricos em clorofila e feofitina, tem um alto teor de água, cheiro de H<sub>2</sub>S e contêm muitos fragmentos de peixes esqueléticos e de zooplâncton. A plataforma continental aparentemente com fossilífero tem uma concentração de 1,10% de fósforo na crista de uma colina a 144 m de profundidade. Concentrações elevadas de fosfato em geral foram encontradas na plataforma a cerca de 1000 m de profundidade.

Burnet (1977) versa que, os nódulos de fosforito do Holoceno achados no fundo do mar da costa do Peru têm uma concentração de apatita endurecida, que é provocada por processos de precipitação e transformação, característica comum na plataforma continental clásticas dessa região, possivelmente em resposta a uma mudança no ambiente sedimentar causada por flutuações no nível do mar eustático, variando de forma significativa o volume de água, ou tectonismo com movimentos de grande escala que ocorrem na litosfera.

Para Cheney (1979), esses depósitos são diferentes de outros depósitos marinhos importantes em que consistem principalmente de fosfato e diatomita e os pellets<sup>1</sup> são compostos de uma apatita de hidroxila de carbonato deficiente em flúor de um tipo não conhecido em outros depósitos marinhos, encontrada em camadas como uma areia esférica fina (60% <150 µm). A apatita, no entanto, é um pouco similar em composição

---

<sup>1</sup> Segundo Folk (1959) os pellets são *allochems* (agregados de carbonato perto de 0,5 mm para cima em tamanho), exemplos incluem também os oóides, peloids, oncolitos, fragmentos fósseis, silte, areia e cascalho rasgados e retrabalhados a partir de depósitos compostos de *micrite* (composto calcário formado por partículas calcárias com diâmetro de até 4 µm formado pela recristalização da lama de cal), independentemente do tamanho, forma ou origem.

àquela do lodo de diatomáceas do Holoceno, época recente do período Quaternário da era Cenozóica, no fundo do mar ao largo da costa peruana.

Rodríguez *et al.* (2011) assegura que o deserto de Sechura possui uma riqueza de recursos não metálicos; isto é, demonstrado pelo grande depósito de Bayóvar, localizado no distrito de Sechura. Os mencionados depósitos de fosfato cujas reservas de mineral são estimadas em 816 milhões de toneladas, equivalentes a 262 milhões de toneladas de concentrados de rocha fosfática a 30% de  $P_2O_5$ , além de diatomitos (45 milhões), carbonatos (42 milhões) e gipsita (7 milhões). As reservas potenciais são estimadas em 10.000 milhões de toneladas.

### 2.3.3 Geologia do Depósito de Fosfato

#### *Geomorfologia*

Segundo Rodríguez *et al.* (2011), Piura, uma região localizada no litoral norte peruano, tem uma geomorfologia formada como consequência da evolução tectônica, orogenia, plutonismo, erosão e intemperismo. As principais características geomorfológicas que predominam na região, a partir do Oeste para o Leste, que são descritos a seguir, são mostradas graficamente na Figura 2.11.

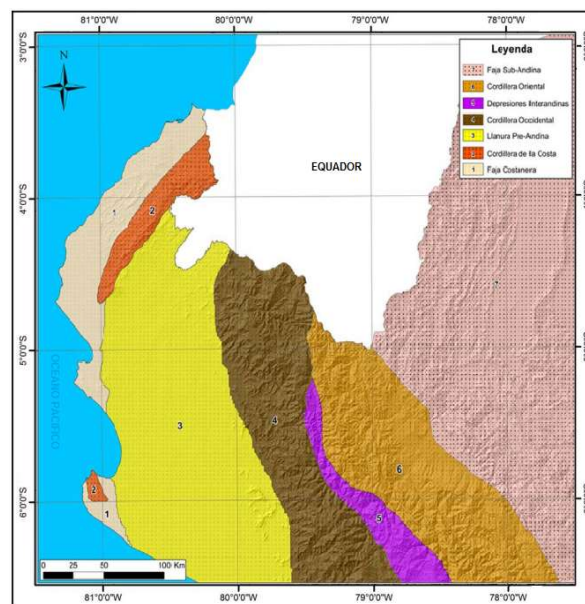


Figura 2.11 - Unidades geomorfológicas da área de estudo. (Rodríguez *et al.*, 2012)

### *Repisa Costanera*

NE é a orientação predominante desta formação e possui largura aproximadamente de 70 km e um comprimento maior do que 150 km, compreendem a borda costeira da costa e os flancos ocidentais de Los Amotapes, estendendo-se ao sul de Talara até Paita e mais ao sul de Sechura. É composto por sedimentos cretáceos e terciários que repousam em um porão paleozóico. A evolução geomorfológica tem sido sujeita a movimentos verticais da fundação que levaram aos terraços marinhos escalonados conhecidos como tablazos, o mesmo que são características geomorfológicas importantes dentro do Repisa Costanera.

### *Tablazos*

Constantes subidas do maciço andino mostram como resultado extensas porções da plataforma continental abrolhadas. A Repisa Costanera e a Depressão Para-Andina dão origem a Los Tablazos. Na Repisa Costanera destacam-se tablazas de Talara, Máncora, Lobitos e Saliña. Na Depressão Para-Andina acontecem os tablazos equivalentes aos Tablazos de Talara e Lobitos. Eles são cortados por quebradas, são cobertos por material de acumulações aluviais e por material transportado pelo vento.

### *Cordilheira da Costa*

Illescas e Amotapes são claros exemplos por um alinhamento de altos picos. Uma cadeia de montanhas escarpadas e acidentadas cortadas por desfiladeiros fluviais é a Cordillera de la Costa, como pode ser visto no curso superior do rio Tumbes. É considerada a continuação do norte da Cordilheira da Costa, no sul do Peru e consiste em uma série de elevações que se estendem desde as Ilhas Lobos de Afuera, Cerro Illescas, Los de Terra, Silla de Paita, com um eixo N-S estendendo-se então com uma virada a nordeste em direção aos maciços de Amotape e La Brea, continuando até o Equador. Rochas ígneas e metamórficas constituem essa cordilheira, do período pré-cambrianas e paleozóicas, sobrepostas às rochas do Cretáceo. O maciço rochoso de Amotape tem uma média de 130 km de comprimento, cerca de 25 a 30 km de largura e a altitude varia entre 250 e 1500 msnm.

### *Cordilheira de Sallique*

A *Cordilheira de Sallique* tem um traço geomorfológico maior que compreende um alinhamento montanhoso localizado no setor oriental de Sallique, onde atinge alturas de até 3700 metros. No setor de Huaringas, ela se funde com a Cordilheira Ocidental para formar uma única unidade orográfica que se estende ao território equatoriano.

### *Terraços Marinhos*

Os terraços marinhos têm traços geomorfológicos menores com superfícies de abrasão desenvolvidas durante o Eoceno superior e durante o Pleistoceno nos flancos do maciço de Illescas como resultado de ascendidas sucessivas. Em comparação com os Tablazos que estão na planície baixa, esses terraços são de menor amplitude e extensão. Existem nove níveis de terraços, alguns dos quais correspondem à deposição da Formação Verdúm do Eoceno Superior, segunda época da era Cenozóica, e outros ao Tablazo de Lobitos.

### *Depressões*

A depressão de Salina Grande, localizada a leste do maciço de Illescas, é bem conhecida, porém existem outras na região ao sul. A depressão de Salina Grande é limitada por uma escarpa e o diâmetro varia entre 14 e 19 km; e abriga a maior concentração de fosfatos no país. As depressões são caracterizadas como características geomorfológicas menores.

### *Estuários*

Dentro da região de Piura, existem vários estuários nas desembocaduras dos rios, o mais conhecido pela sua antiguidade é o estuário do Virrilá, na antiga foz do rio Cascajal. Outro também conhecido é o de San Pedro, na foz do rio Piura, que não flui para o mar através da cobertura do vento. Considerados como um traço geomorfológico menor.

### *Lhaneza de Inundação*

São superfícies extensas que são distribuídas ao longo da costa. Essas planícies são inundadas durante as cheias de rios, como os rios Piura e Chira. O seu nível é por vezes

inferior ao do mar, no entanto, não são invadidos pela sua água devido às cordas costeiras. São considerados como um traço geomorfológico menor na região.

### *Vales*

Piura tem vales fluviais, localizados principalmente no Vale do Chira, com direção predominante NE e não menos importante, o vale Alto Piura de direção NO. Outros vales de menor importância são o Vale de San Lorenzo e as partes mais altas da Cordilheira Ocidental.

### *Depresión Para-andina o Llanura Costanera*

Palacios (1994) afirma que, *Depresión Para-andina o Llanura Costanera* caracteriza-se por ser uma superfície plana levemente ondulada, formada pela ação erosiva, em uma região dobrada entre a Cordilheira da Costa e os contrafortes da Cordilheira Ocidental. Inclui os desertos de Olmos e Sechura e estende-se ao sul de Piura até Lambayeque. Nessa faixa foram desenvolvidas extensas áreas cobertas por jazidas eólicas, cortadas pelos rios Piura e Chira. A morfologia é ondulada com declives suaves ao norte de Sechura. Nessa depressão Pará-andina, encontram-se rochas vulcânicas, sedimentares e plutônicas do Mesozóico e Cenozóico. No deserto de Sechura, sob os depósitos eólicos e aluviais estão os tablazos marinhos do Pleistoceno, que corresponde à escala de tempo geológico, ou na época do período Quaternário da era Cenozóica do éon Fanerozóico.

### *Cordilheira Ocidental*

Conforme Reyes e Caldas (1987), a Cordilheira Ocidental tem uma altitude máxima de 3900 metros acima do nível do mar, que compreende um vasto território. Ao oeste do cânion de Huancabamba, localiza-se uma faixa estreita que é a parte mais alta. Forma a divisão continental no noroeste do Peru; isso é evidenciado pela Abra de Porculla, também chamada de Paso de Porculla, uma baía não muito extensa, de 2.200 metros e na área de fronteira dentro do quadrado de San Antonio, onde ela atinge 3.900 metros. Observando-se morenas e lagoas glaciais que são evidências de uma era glacial.

De acordo com Rodríguez *et al.* (2012), as unidades geomorfológicas descritas por bacias:

Talara (Cenozóico), Lancones (Cretáceo), Sechura (Cenozóico), Progreso (Cenozóico) e oriental são mostradas no mapa de localização das bacias sedimentares, bem como os maciços que compõem o subsolo. As depressões são caracterizadas como unidades menores. A depressão de Salina Grande é bem conhecida, localizada ao leste de Illescas, ela é limitada por uma escarpa, o diâmetro varia entre 14 e 19 km e abrange a maior concentração de fosfatos do país. A Figura 2.12 mostra as diferentes unidades geomorfológicas da área de estudo representando as bacias e formações geológicas principais.

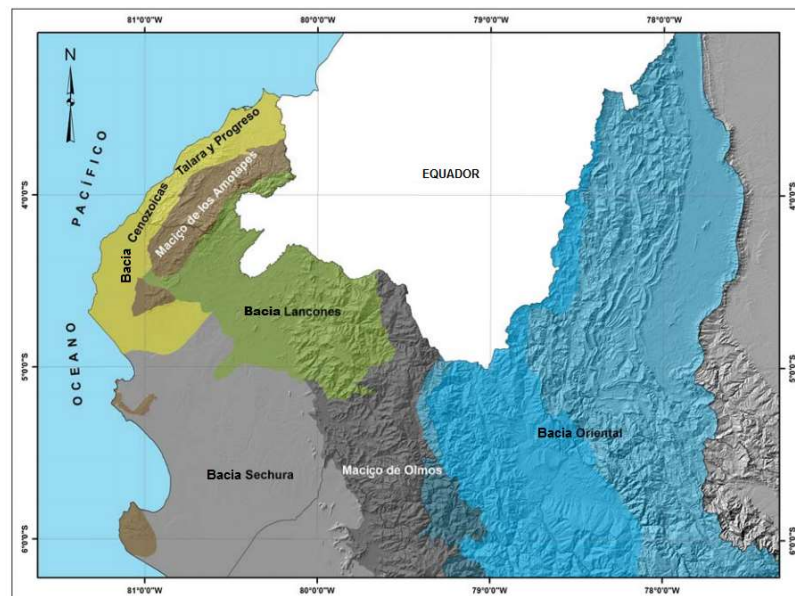


Figura 2.12 - Unidades geomorfológicas da área de estudo (Rodríguez *et al.*, 2012)

A Formação Zapallal, própria do mioceno, tem a maior espessura e extensão, formada por uma sedimentação associada a um processo de subsidência profunda. Nessa formação é possível observar a distinção de dois membros principais, com diferentes níveis, separados por uma camada de argila. Na parte inferior, consiste em camadas de fosfatos intercaladas com diatomites fosfáticas. Nessa sequência está um nível de tufos macios de tons cinzentos, e sobre eles repousa outra sequência de diatomitas. Em direção à parte superior, um arenito ocre de grão fino a médio (Arenisca Clambore) é facilmente identificado, e uma camada de fósforo de granulação grossa é sobreposta. A formação avança na região de Bayóvar.

## CAPÍTULO 3

### SEDIMENTAÇÃO: FENÔMENOS DE SALINIDADE, COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO

#### 3.1 INTRODUÇÃO

O tratamento de efluentes industriais gera fenômenos essenciais denominados coagulação e floculação para acelerar o processo de sedimentação do material em suspensão. A coagulação é um processo químico que envolve a neutralização da carga, enquanto a floculação é um processo físico e não envolve a neutralização dela. Os sais de metais multivalentes chamados comumente de coagulantes e floculantes inorgânicos, de modo habitual, são usados devido à sua facilidade de uso e custo econômico, que os tornam ótimos agentes.

Nos últimos tempos, a utilização de coagulantes e floculantes orgânicos cresceu muito por conta da sua notável capacidade de flocular eficientemente com baixa dosagem. Embora cada um apresente desvantagens, tais como uma aplicação restrita com baixa eficiência de floculação e a presença de concentração de metal residual na água tratada, para os inorgânicos, e uma aplicação associada à falta de biodegradabilidade e dispersão de resíduos de monômeros na água, o que pode representar um risco à saúde - no caso dos orgânicos (Lee *et al.*, 2014).

Imai (1981) assevera que, três etapas estão presentes no processo de deposição e ocorrem seguindo uma sequência ou que acontecem ao mesmo tempo: esses estágios são floculação, sedimentação e adensamento. Da Figura 3.1 pode se inferir que no decorrer do estágio da floculação acontece exclusivamente a floculação de partículas do solo, conservando a estabilidade inicial do teor de sólidos. No estágio da sedimentação, duas áreas com características divergentes coexistem na mistura: a área de sedimentação e a área de adensamento.

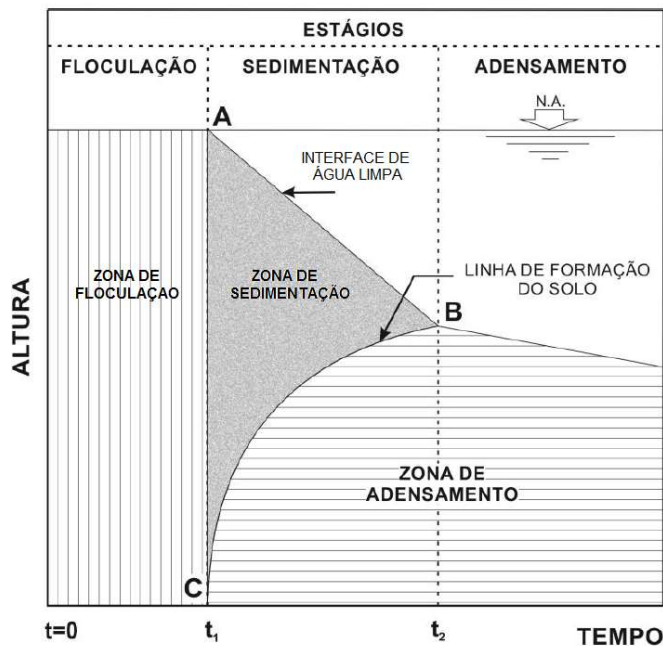


Figura 3.1 - Estágios (sequência) de deposição das partículas de solos finos  
(Adaptado de Imai, 1981)

Na área superior de sedimentação, os flocos do solo descendem através do líquido. O teor de umidade nessa área torna-se gradativamente maior, o que se deve à perda de partículas para a área inferior de adensamento. O limite entre as duas áreas é uma linha de disposição ordenada de sedimento a partir da sedimentação das partículas da mistura solo-líquido. Finalmente, a área de sedimentação desaparece e o sedimento subjacente forma o solo, acontecendo o estágio do adensamento.

### 3.2 DISTRIBUIÇÃO DE SEDIMENTOS EM BARRAGENS

A NBR 10004 (ABNT, 2004) classifica os rejeitos como resíduos inertes, não inertes e perigosos (obrigatoriedade de sistemas de impermeabilização). As barragens de rejeito devem ser projetadas de acordo com a norma NBR 13028 (ABNT, 2017). A polpa do rejeito, que é uma mistura de água e sólidos, é procedente das unidades de concentração e é colocada e armazenada em depósitos denominados barragens ou tanques. Esse material pode ser depositado de forma líquida sobrenadante, com tendência à floculação das partículas de menor tamanho; rejeito em processo de sedimentação apresentando comportamento semilíquido a semi viscoso; e rejeito em processo de adensamento comportando-se como um material particulado.



Os métodos mais aplicados para depositar os rejeitos estão baseados em três modelos construtivos muito utilizados, como o método de alteamento por linha de centro, o de alteamento para Jusante e o de alteamento para montante. Esse último método é o mais econômico das três técnicas de disposição, porém, o mais suscetível a problemas de controle de segurança e de qualidade. Geralmente são utilizados os próprios rejeitos para a construção e são considerados os fatores como as propriedades mecânicas dos materiais, a natureza do processo de mineração, as condições geológicas e topográficas da região. Vick (1983) aponta um fator muito importante para aperfeiçoar a disposição do rejeito, são as características da composição química do rejeito.

Para a técnica do lançamento dos rejeitos em barragens, o processo convencionalmente adotado é a disposição em aterros hidráulicos, com eles em forma de polpa. Esse fenômeno trata de uma seleção de grãos em função do tamanho, da forma e da densidade das partículas. Elas se depositam gradualmente ao longo da trajetória do fluxo de polpa. As características de deposição do material são alteradas devido à uma variabilidade estrutural quando é depositado. É muito importante a distribuição de sedimentos nas barragens de acordo com o comportamento da segregação do rejeito para possíveis estudos de otimização da estocagem do depósito.

### **3.3 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS FINOS**

Em hidráulica, o transporte de sedimentos é um fenômeno natural que acontece pelos agentes de traslado no processo de forma de carga em suspensão e de arrasto no leito; o conhecimento do tipo de alterações, com a forma do espaço ou a existência de algum obstáculo pode gerar uma mudança no equilíbrio da dinâmica sedimentar, o que contribui para o entendimento no setor interno do processo de sedimentação. Nos últimos tempos, estão se desenvolvendo pesquisas científicas para aperfeiçoar as técnicas essenciais da sedimentação em reservatórios na área da mineração, modelos matemáticos objetivados na hidrossedimentologia (estudo das partículas de sedimentos depositados em reservatórios) para a gestão operacional de beneficiamento hidráulico com o propósito de evitar prejuízos sociais e econômicos, tais como consequência da perda de volume útil dos reservatórios.

Garcia (2008) diz que, a linha de pesquisa dos estudos procura avaliar o comportamento do escoamento da combinação da água com o sedimento, que de acordo com os princípios da quantidade de movimento e de conservação da massa, está relacionada com equações baseadas na experiência laboratorial e de campo. Para o aperfeiçoamento dos cálculos e do tratamento computacional de dados e informações, modelos podem adotar um comportamento visando à solução do transporte de sedimentos, que estabelece uma relação com um histograma contínuo por uma série de perfis com discretização do escoamento aproximadamente permanente. A Equação 3.1 representa a relação de Einstein adotada como base para a capacidade de transporte dos sedimentos, considerando que o tamanho dos grãos para a descarga sólida está diretamente relacionado com o percentual relativo ao tamanho dos grãos no leito final.

$$T_c = \sum_{j=1}^M \eta_j T_j \quad 3.1$$

Onde:

$T_c$  = Capacidade de transporte global de sedimento

$\eta_j$  = Percentual relativo de sedimentos para o tamanho de grãos  $j$

$M$  = Quantidade de tamanhos diferentes de grãos

$T_j$  = Capacidade de transporte de sedimentos para o tamanho de grãos  $j$

### 3.4 CAUSAS DA SEDIMENTAÇÃO

Para Bussière (2007), citado por Gorakhki (2015), os rejeitos de minas são resíduos do processamento de extração de minério que contém partículas de grãos finos ( $<0,075$  mm) de rocha pulverizada, água de processo e conteúdo de minério não econômico ou irrecuperável. Uma tubulação para descarte e gerenciamento em uma instalação de armazenamento desse material (TSF do inglês Tailings Storage Facility) é geralmente utilizada para transportá-los de minas que têm alto teor de água.

As funções do tamanho e do peso específicos são considerações primárias que controlam o comportamento das partículas grossas em suspensão, durante o tempo em que as forças que existem entre elas dominam o comportamento de sedimentação das partículas de grãos finos em suspensão devido ao baixo peso delas e à alta área superficial específica;

outra função é a forma, teor de sólidos e a densidade das partículas, como visto na Tabela 3.1. A disposição das partículas do solo que se estabelecem em suspensão conhecida como sedimentação também estará relacionada com a densidade e viscosidade do fluido (Gorakhki, 2015).

Tabela 3.1 – Classificação dos tipos de sedimentação (Spottiswood, 1989 citado por Guimarães, 2010)

Descrição da Polpa	Descrição da Sedimentação	Exemplos	Métodos de Teste
Diluída (clarificação)	Partículas ou flocos inicialmente sedimentam independentemente, sem interface. A sedimentação depende muito do tamanho da partícula ou floco, mas também da concentração.	Água turva, silte e rejeito tratado.	Proveta
Intermediário (clarificação)	Acima da zona de subsidência, independente da partícula e abaixo da zona de subsidência coletiva. Não existe interface clara neste caso.	Lamas de tratamentos químicos e metalúrgicos, sedimentos brutos.	Proveta e curvas de fluxo de Kynch
Concentrado (espessamento)	O material sedimentar com interface clara. A taxa de sedimentação é função somente da concentração. Na prática, a taxa inicial de sedimentação pode aumentar segundo a formação do flóculo e decair à medida que atravessa a interface.	Lamas de tratamentos químicos e metalúrgicos, lamas ativadas.	Curvas de fluxo de Kynch.
Compressíveis (espessamento)	Sedimentação inicialmente com interface clara. Camada de lama não ideal. Depende da espessura da camada.	Particularmente suspensões floculadas	Curvas de fluxo de Kynch.

Estudos de sedimentação realizados em rejeitos de mineração são insuficientes em certa medida. A existência de minerais argilosos em alguns rejeitos cria desafios na sedimentação para deposição em tanques ou barragens. Algumas literaturas (Spottiswood, 1989, Guimarães, 2010) sugerem que o comportamento de sedimentação dos minerais argilosos pode ser acoplado a rejeitos para avaliar seu processo de sedimentação, além de incluir como um dos fatores que influenciam nesse processo o cloreto de sódio, a água residual que ocupa os espaços dos poros do solo e a mineralogia do material, para decifrar o comportamento da sedimentação dos rejeitos. Aliás, o tipo de sedimentação, de modo geral, depende da concentração de sólidos na suspensão.

### 3.4.1 Mecanismos de colisão

Conforme Bussière (2007), citado por Gorakhki (2015), a estabilidade coloidal de longo prazo de rejeitos de minas, ou seja, a dispersão de partículas em solução é problemática

em instalações de armazenamento desse material devido à baixa resistência ao seu cisalhamento, consolidação limitada e ganho de resistência com o tempo e dificuldade na recuperação de água para processamento subsequente de minério. O estado coloidal pode se desestabilizar pela presença de sais solúveis nos rejeitos de minas, promovendo o ganho de força e a melhora da recuperação da água mediante a potencialização da sedimentação e a consolidação (Kotylar *et al.*, 1996 citado por Gorakhki, 2015).

### **3.4.2 Mecanismos de coesão e agregação**

Mehta (1986) assegura que as forças mútuas experimentadas por duas ou mais partículas de argila nas proximidades são o resultado das forças relativas, atraentes e repulsivas; as forças atrativas são devidas à interação dos campos elétricos formados pelos dipolos nas moléculas individuais, as repulsivas são devidas às nuvens iônicas de carga semelhante se repelindo. O resultado pode ser atraente ou repulsivo dependendo das magnitudes relativas. Em suspensões com uma concentração de íons muito baixa, a camada dupla de íons é grande e as forças de repulsão mantêm as partículas muito afastadas para que as forças de atração, que variam inversamente com a sétima potência de distância entre as partículas, entrem em vigor.

À medida que a concentração de íons é aumentada, a camada dupla é reduzida em tamanho e as forças de repulsão tornam-se pequenas o suficiente para que as partículas se aproximem e que forças atrativas prevaleçam, as partículas então se unem para formar flocos. Além das propriedades do material, o outro fator que afeta a coesão que pode variar em um estuário é a salinidade relacionada à concentração de íons. Com minerais de argila negativamente carregados, como por exemplo, a montmorilonita ou illita, em suspensão, a adição de cloreto de sódio causa a floculação, os cátions de sódio monovalentes formando a nuvem de íons ao redor das partículas de argila.

A água do mar, em geral, tem um efeito ainda mais forte porque, geralmente, contém vários sais de metais de maior valência; pode parecer que os flocos podem crescer indefinidamente em tamanho. No entanto, à medida que eles se tornam maiores, caem mais rápido até que o cisalhamento do fluido exercido sobre eles se torne maior do que a força de ligação entre as partículas; quando as duas forças são iguais, os flocos atingiram um tamanho terminal e velocidade de sedimentação.

### 3.5 VELOCIDADE DE SEDIMENTAÇÃO

A velocidade de sedimentação resulta da relação do deslocamento vertical das partículas em um meio aquoso em um tempo determinado. Essa velocidade pode ser influenciada pelo uso de aditivos que permitem otimizar seu valor normal. A velocidade de sedimentação natural leva um tempo prudente para terminar o processo de sedimentação. Porém, o uso de coagulantes e floculantes pode reduzir o tempo na decantação das partículas, conseguindo diminuir a velocidade de sedimentação; como consequência, há uma melhora nesse processo, além de diminuição das áreas. A Figura 3.2 mostra a evolução da velocidade de sedimentação, gerando uma pasta mineral como disposição final do rejeito, o qual tem maior valor e relevância do que a disposição tradicional quando visado em melhorar as condições industriais. Portanto, os coagulantes e floculantes são ferramentas amigáveis nos processos de sedimentação na mineração.

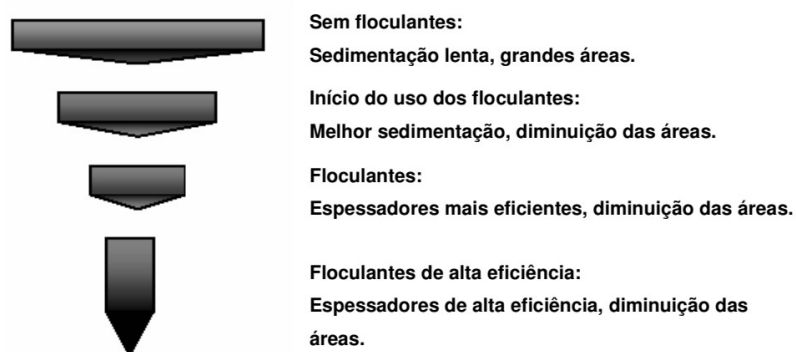


Figura 3.2 - Evolução da velocidade de sedimentação no desenho básico de espessadores.  
(Fogwill, 2005 citado por Falcucci, 2007)

Um fator importante que determina a velocidade de sedimentação é a massa específica do material, nesse caso a natureza do minério terá influência direta no rejeito. Outro fator a ser considerado é a granulometria devido ao volume que as partículas possuem, finas ou grossas. Aliás, a viscosidade da polpa pode ter influência considerável durante a sedimentação, concordando que quanto menor for ela, maior será a velocidade com que o rejeito se movimentará.

Pode-se inferir também que o rejeito, ao possuir uma maior velocidade de sedimentação, será inversamente proporcional à sua compressibilidade. Então, a velocidade de sedimentação é o movimento no qual as forças que exercem influência na partícula chegam à uma estabilidade e a própria dá início a esse processo com velocidade estável e contínua. O modo como se comporta um sólido se movimentando em um fluido pode ser avaliado levando em análise duas forças constituintes desse processo: a aceleração e a massa da partícula. No processo de sedimentação também existem forças contrárias como o empuxo resultante da força exercida pelo líquido.

Durante a sedimentação podem acontecer três tipos de desenvolvimentos como mostrado na Figura 3.3. O primeiro desenvolvimento (I), no qual as partículas têm tamanho e densidade uniformes, a velocidade delas gera uma interface descendente que mantém seu teor de sólidos constante, representada com a letra B, entre o líquido clarificado (A) e o sedimento até atingir o fundo (D), para finalmente suportar as forças exercidas pelo líquido. O segundo desenvolvimento (II) possui uma faixa estreita de distribuição granulométrica, originando uma nova interface, representada com a C, como consequência da ligeira diferença de tamanhos de grãos de difícil percepção, logo, conclui-se que a fase D terá uma alta proporção e uma alta taxa de crescimento. Para o terceiro desenvolvimento (III) com uma ampla faixa de distribuição granulométrica, a fase B perde valor instantaneamente no processo de sedimentação, sendo que a interface C torna-se a de maior relevância, porém pode acontecer que os espaços formados pelos grãos maiores sejam preenchidos pelos menores e sejam arrastados ao fundo, acontecendo então o primeiro desenvolvimento, esse fenômeno é provocado por fatores mecânicos, mas controlados por hidrodinâmicos.

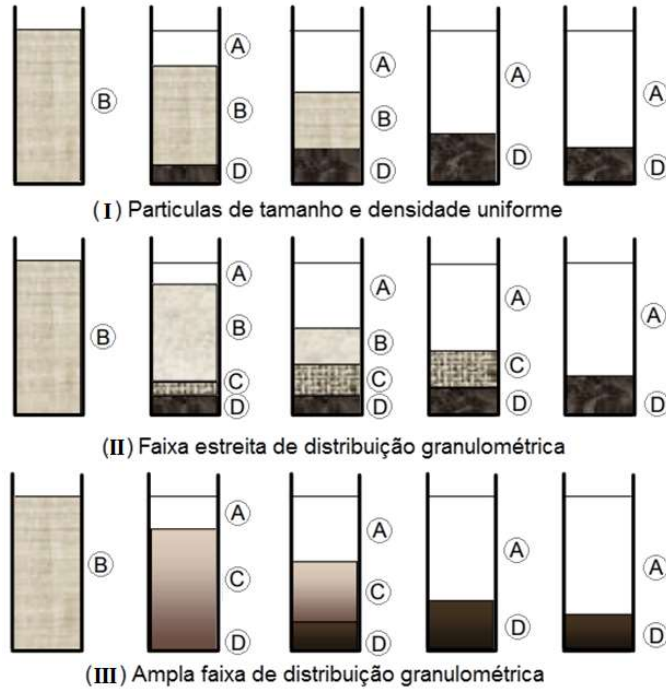


Figura 3.3 - Teste para o comportamento de sedimentação (WILLS, 1997 citado por Guimarães, 2010)

Para o cálculo da velocidade de sedimentação são utilizadas equações que utilizam correlações empíricas para um processo de sedimentação com uma decantação retardada. Geralmente é utilizada a Equação 3.2 (Lei de Stokes para o regime laminar) ou Equação 3.3 (Lei de Newton para o regime turbulento). Considerando para o caso dos rejeitos uma sedimentação com decantação livre (sem interferência mútua das partículas) ou retardada (com interferência).

$$V_s = \frac{2}{9} \frac{r^2 g (\rho_p - \rho_f)}{\eta} \quad 3.2$$

Onde:

$r$  = rádio da partícula

$\eta$  = viscosidade do fluído

$g$  = gravidade

$\rho_p$  = densidade das partículas

$\rho_f$  = densidade do fluído

$$V_s = \sqrt{\frac{4rg(\rho_p - \rho_f)}{3\rho_f C_d}} \quad 3.3$$

Onde:  $C_d$  = coeficiente de resistência ou arraste

### 3.6 EFEITO DA SALINIDADE NA VELOCIDADE DE SEDIMENTAÇÃO

A velocidade de sedimentação sujeita à influência da salinidade em materiais em suspensão tem sido muito aprofundada academicamente para casos característicos de uma área de estudo para prever o seu comportamento cinético, além do aumento da salinidade reduzir de modo considerável a repulsão eletrostática (Krone, 1962; Allersma, 1966; Migniot, 1968; Edzwald *et al.*, 1974; Burt 1986; Kranenburg, 1994; Winterwerp, 1998; Thill *et al.*, 2001; Gratiot e Manning, 2004; Maggi, 2005; Manning *et al.*, 2007; Verney, 2009; Graham e Nimmo Smith, 2010; Portela *et al.*, 2013; Ji *et al.*, 2013; Nasiha e Shanmugam, 2018).

Krone (1962), no seu trabalho utilizou o processo tradicional de sedimentação para estabelecer o efeito da salinidade na floculação em um ambiente aquático de transição entre um rio e o mar. Foram mensuradas as velocidades de sedimentação das partículas suspensas em líquidos com diferentes teores de salinidade utilizando provetas graduadas de 1 litro. A metodologia consistiu em fazer as medições das velocidades logo após de haver reproduzido as condições naturais de agitação com ajuda de uma haste. O autor descobriu que, para concentrações de sólidos suspensos até 530 ppm, a velocidade de sedimentação de um sedimento coesivo era independente da salinidade acima de 5 ppt.

Na Figura 3.4 é mostrado o efeito da salinidade nas velocidades medianas de sedimentação dos flocos resultantes com concentrações de suspensão de 1,0; 0,53; 0,22; 0,12 g/L. As curvas mostram que para salinidade de 1 g/L o efeito da floculação é significativo e é grande para a concentração de suspensão de 120 mg/L. Para 15 g/L, o efeito da salinidade na floculação é virtualmente completo para a maior concentração de sedimento em suspensão, pode acontecer também que os flocos maiores sejam mais propensos a quebrar um com o outro após uma colisão.



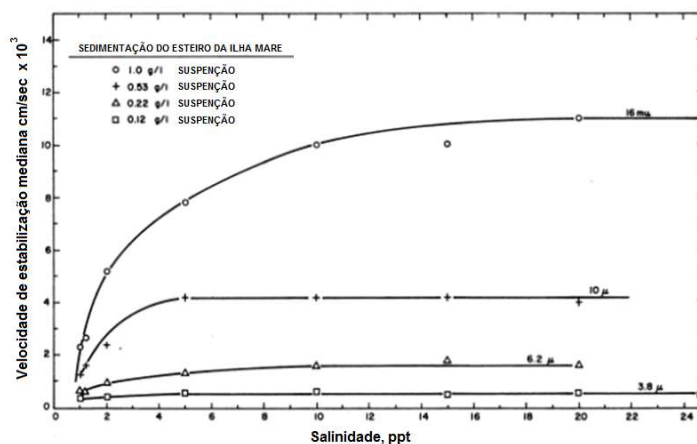


Figura 3.4 - Efeito da salinidade na floculação (Krone, 1962)

Na Figura 3.5 mostra-se a importância da concentração de sedimentos em suspensão para as taxas de sedimentação do material em suspensão. Uma vez que o processo de sedimentação continua e é melhorado pela floculação, a concentração de sedimentos em suspensão torna-se muito influente no processo, até o ponto de ter um efeito muito grande nas taxas de movimentos.

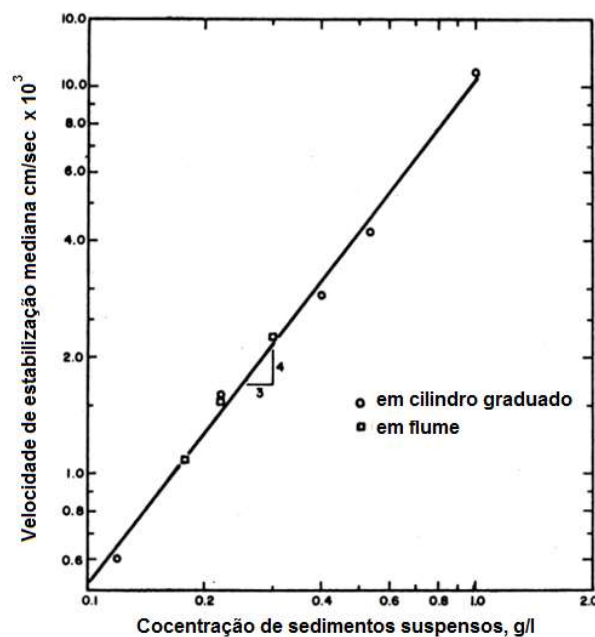


Figura 3.5 - Velocidades de sedimentação de sedimentos com floculante (Krone, 1962)

Segundo Allersma *et al.* (1966), ensaios feitos com sedimentos muito finos provenientes do estuário do rio Chao Phya na Tailândia, abrangeram um levantamento de campo para tirar amostras de água e sedimentos, além de medir a altura das ondas mediante eco-

sondagens. Em um laboratório, as amostras de água e sedimentos foram testadas quanto à concentração de silte, salinidade e propriedades mecânicas do solo, aplicando um teste de modelo hidráulico.

Resultados para uma salinidade de 5 ppt a velocidade de sedimentação aumentou para 30 vezes o seu valor de água doce, mas a 25 ppt a velocidade de sedimentação foi apenas duas vezes o seu valor a 5 ppt. O autor também faz referência à interação da estrutura dos cristais com a água com sais dissolvidos, as forças de partículas podem tornar-se grandes em relação ao peso das partículas; para uma salinidade de 3000 ppm as forças diminuem e as suspensões são muito instáveis.

De acordo com Migniot (1968), quantidades baixas de sais floculantes ou água do mar são suficientes para a floculação ocorrer. Assim, sedimentos dispersos em água destilada com quantidades crescentes de sais marítimos, verifica-se que a velocidade de queda dos flocos é diretamente proporcional ao aumento da concentração de sal, até atingir um valor máximo ótimo. O autor observou que a velocidade de sedimentação era constante em salinidades acima de 3 ppt para baixas concentrações de sólidos suspensos e acima de 10 ppt para altas concentrações.

Por outro lado, o autor também pesquisou uma concentração inicial das partículas sólidas em suspensão relativamente alta, que pode ocorrer por altas salinidades. Para uma macrofloculação, a velocidade de queda seria então ligeiramente maior para uma salinidade de 5% do que para 30%. A ação defloculante de sais, em suspensões de lodo em água doce fluvial, pode levar, de acordo com a quantidade de sais introduzidos, a fenômenos muito diferentes.

Para Edzwald *et al.* (1974), a salinidade é um parâmetro dominante que controla os processos de sedimentação em águas salgadas, com ênfase em ensaios para avaliar os fatores hidrodinâmicos e físicos com um valor de estabilidade, com ensaios químicos feitos para complementar o estudo. Demonstrou-se que existe uma relação entre a fração granulométrica e a salinidade que afeta a deposição de materiais suspensos em estuários. O autor desenvolveu um modelo em que o transporte de suspensões coloidais de águas doces para estuários é acompanhado por uma redução na estabilidade de partículas, resultando na deposição desses materiais em estuários e é mostrado na Figura 3.6.

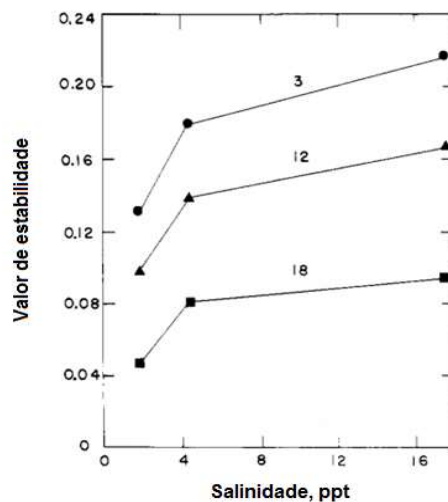


Figura 3.6 - Valor de estabilidade em função da salinidade para fração granulométrica de sedimentos Pamlico (Edzwald *et al.*, 1974)

Os resultados apresentam os estudos da taxa de coagulação usados para determinar os valores de estabilidade para três sedimentos. Para qualquer dada salinidade (ou força iônica) o valor de estabilidade é mais alto para o sedimento de água doce a 3 e menor para o sedimento do estuário inferior a 18, sendo esse o mais estável; os sedimentos depositados a montante sofrem agregação de partículas mais rapidamente. A deposição de matéria em suspensão pode ter efeitos significativos na qualidade da água.

Conforme Burt (1986), o efeito floculante da salinidade em estuários lamacentos mostra um efeito quase linear da salinidade variando entre 0 e 28 ppt na velocidade de queda no estuário estudado. Embora no estudo ela pareça não ter efeito sobre as velocidades de sedimentação, conclui-se que isso ocorre devido à diferença entre as medidas de laboratório e de campo. Os flocos têm tempo para se desenvolverem até seu tamanho ideal, enquanto no laboratório o efeito da alta salinidade na aceleração da floculação é significativo no contexto do tempo de decantação.

O tempo é o principal fator no fenômeno da floculação, o autor propõe que tanto o tempo de sedimentação através de colunas laboratoriais, quanto o gradiente de velocidade de sedimentação associado, não permitem a plena refloculação. No estuário, o material é mantido em suspensão por tempo suficiente para uma melhor floculação, ocorrendo não só nas altas salinidades, mas também para o mesmo grau de floculação ocorrendo a baixas

salinidades. Então, a salinidade não afeta o tamanho médio final do floco, porém a formação dele é acelerada e a sua velocidade aumenta significativamente.

Kranenburg (1994) assevera que as investigações da velocidade de sedimentação de flocos podem ser calculadas teoricamente a partir da dimensão fractal (Equação 3.4), o tamanho deles e o diâmetro das partículas primárias, de acordo com a relação dada e assumindo a Lei de Stokes, que se refere à força de fricção experimentada por partículas esféricas pequenas que se movem a velocidades baixas em um fluido viscoso. As velocidades de sedimentação foram calculadas a partir do tamanho médio do floco e da dimensão fractal alcançadas no estado estacionário de cada teste de floculação que o autor fez.

$$\rho_f = \rho_w + (\rho_s - \rho_w) \left( \frac{D_p}{D_a} \right)^{3-n_f} \quad 3.4$$

Onde  $\rho_f$  é a densidade do floco estimada,  $\rho_w$  a densidade da água,  $\rho_s$  a densidade da argila/silte,  $D_p$  é o diâmetro das partículas primárias que compõem o floco,  $D_a$  é o diâmetro de flocos e  $n_f$  é a dimensão fractal e pode variar de 1 a 2, com  $n_f = 2$  representando uma esfera.

Para Winterwerp (1998), os efeitos da turbulência foram analisados em águas estuarinas e a velocidade de sedimentação foi mostrada para não escalar com o diâmetro  $D$  ao quadrado, como previsto pela Lei de Stokes, mas com  $Dn_f-1$ . O autor mostra que o tamanho máximo de floco atingível e a velocidade de sedimentação são determinados em grande medida, especialmente a baixos níveis de turbulência, pelo tempo de permanência disponível, isto é, a profundidade da água. Também faz ênfase nos parâmetros físico-químicos do sedimento e da água para o processo de floculação.

Thill *et al.* (2001) assegura, que avaliou os perfis de salinidade com uma metodologia baseada na amostragem durante um período curto, os resultados apresentaram variações hidrodinâmicas entre os diferentes dias de amostragem: algumas variações no período de baixa descarga de água para avaliação das partículas e das medições de salinidade. Fazendo uma comparação entre essas variações que são moderadas de acordo com as mudanças entre os diferentes estudos de campo. No que diz respeito à agregação induzida pelo sal, a cinética da reação depende da repulsão eletrostática entre as partículas, que é

dependente da salinidade. Um aumento no gradiente de velocidade acoplado a agregados mais frágeis pode promover a quebra.

Segundo Gratiot e Manning (2004), existe uma influência dos processos físicos que afetam a flocculação da lama em água salgada, além da influência das composições biológicas e químicas na eficiência de colisão interparticular. Para os ensaios com forçamento hidrodinâmico controlado feitos em laboratório, foram utilizadas técnicas observacionais de vídeo de alta resolução que permitiram fazer as medidas do tamanho do floco e da velocidade de sedimentação, deixando evidente que as escalas de tempo associadas ao transporte turbulento são muito menores do que as associadas aos processos de flocculação.

Os autores realizaram cada experimento com misturas fluidas de lama com uma salinidade de  $16,5 \pm 0,1$  ppt e com teores de sólidos de 2 até 8 g/l, o aumento desse foi proporcional para a frequência de colisão de partículas o que significou também o aumento do processo de flocculação a um grau alto. Comparou-se a distribuição de tamanho e a velocidade de sedimentação de macroflocos e microflocos e as propriedades médias de flocos para os diferentes tipos de sedimentos sob as várias faixas de concentração experimental, demonstrando que as propriedades deles mudam em resposta ao seu ambiente.

Maggi (2005) fala que a salinidade é conhecida por aumentar a coesão dos solos finos como argilas minerais e, assim, a flocculação. A presença de sal na água natural produz cátions e íons livres que causam uma diminuição da barreira de energia e, finalmente, uma eliminação para concentrações médias a altas de sal; o autor indica vários pesquisadores que sugerem diferentes concentrações de sal para diferentes minerais, como caulinita, illita e montmorilonita.

Para Graham e Manning (2007), a estrutura de fluxo turbulento e as características do floco quantificadas podem ter uma influência biológica. Para afirmar isso, foram feitos ensaios recriando o ambiente estuário mantendo a salinidade e a temperatura, usando um sistema de características de flocculação espectral de laboratório que tem uma configuração única de câmera de floco capaz de medir diretamente o tamanho total do floco espectral e a velocidade de sedimentação. As observações da velocidade de

sedimentação deles concluíram que é inversamente proporcional ao diâmetro do floco esférico equivalente, enquanto a densidade efetiva diminui com diâmetro do floco esférico equivalente.

Conforme Manning *et al.* (2007), o processo de floculação é dinamicamente ativo e dependente de um conjunto de interações complexas entre o sedimento, o fluxo e o fluido, o que torna a sua parametrização difícil. Ensaios com lamas estuárias com concentrações de 0,1 a 2 g/l utilizaram o sistema de câmera de vídeo de floco para a floculação espectral de laboratório, em combinação com um mini-canal anular para cortar as suspensões de sedimento suspenso. Flocos do mesmo tamanho tinham uma ampla gama de velocidades de sedimentação demonstrando uma limitação e imprecisão potencial na medida de apenas uma dessas três variáveis.

Verney (2009) diz que foram feitos ensaios de laboratório com ênfase nos parâmetros como eficiência de floculação, velocidade e tempo de floculação, e observou-se que organismos unicelulares como a diatomácea aumentam fortemente a velocidade desse processo e, em menor escala, a sua eficiência. Evidencia-se o controle efetivo do florescimento das diatomáceas e a concentração de matéria particulada suspensa na cinética de crescimento do floco, uma vez que esses dois parâmetros melhoram a velocidade de floculação e a eficiência da floculação.

A salinidade pareceu ser um parâmetro de controle de relevância secundária cujos efeitos não são muito claros, quando comparados com a presença da diatomácea e a concentração de matéria particulada suspensa. Porém, quando se inicia a formação do floco, a intensidade turbulenta é um dos principais fatores determinantes do seu tamanho máximo. Os resultados dos ensaios são apresentados nas Figuras 3.7 e 3.8 e mostram a relação da velocidade e o diâmetro do floco em diferentes estuários respectivamente.

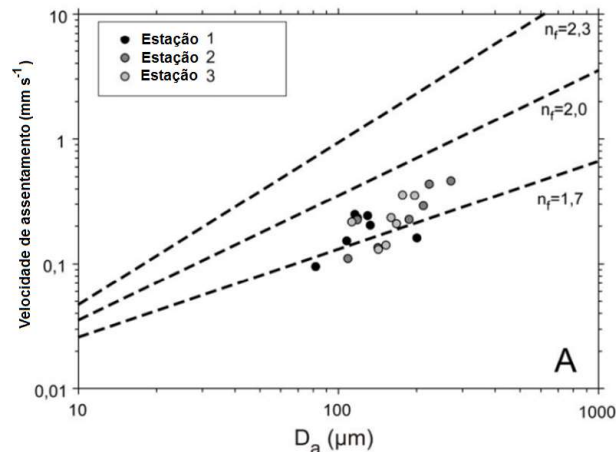


Figura 3.7 - Relação da velocidade e o diâmetro do floco (Verney, 2009)

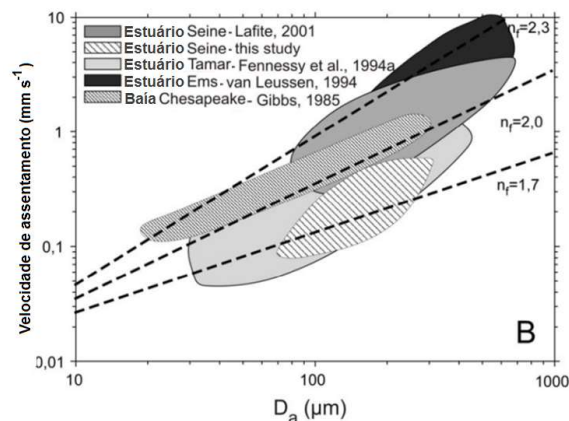


Figura 3.8 - Relação da velocidade e o diâmetro do floco em diferentes estuários (Verney, 2009)

Graham e Nimmo Smith (2010) utilizaram um sistema submersível de imagens de partículas holográficas em linha digital para o cálculo da velocidade de sedimentação em ensaios de coluna. Essas foram preenchidas com água do mar e as partículas coesivas foram retiradas de uma suspensão pré-fabricada de lama da zona costeira, por pipeta, e deixada sedimentar verticalmente. O sistema de geração de imagens de partículas digitais holográficas, com 10 imagens por segundo, foi suficiente para capturar as partículas em velocidade de até 17 mm/s.

Os autores também dão ênfase nos sedimentos coesivos, pois eles são extremamente sensíveis às condições hidrodinâmicas. Afirmar-se que não existe uma relação consistente entre o tamanho da partícula e a velocidade de sedimentação, e para uma estimativa dessas, seria necessário demonstrar uma modificação no sistema em que partículas de sedimentação são automaticamente rastreadas e dimensionadas. A velocidade de

sedimentação e as variações de densidade efetiva em função do tamanho das partículas mostram excelente concordância em uma variedade de ambientes marinhos.

Portela *et al.* (2013) aponta que a velocidade de sedimentação das partículas do solo é incerta devido à influência da salinidade. De um profundo estudo do efeito da salinidade na velocidade de sedimentação de sedimentos finos coletados em uma bacia portuária, da cessação da turbulência, as velocidades de sedimentação aumentaram em relação direta com o aumento da salinidade, conclui-se que a sedimentação aumenta por um fator de 6,5 entre as condições de água doce e marinhas.

Segundo Ji *et al.* (2013), é importante conhecer a sedimentação dos rejeitos de mineração que se veem afetados por fatores como a salinidade da água e o tipo e dosagem de flocculantes durante o processamento mineral para melhorar a sedimentação. O aumento da salinidade reduz de modo considerável a repulsão eletrostática, o que significa uma melhor interação do flocculante com os sólidos, beneficiando a sedimentação; a utilização de água do mar e seu teor de salinidade é responsável pela taxa de sedimentação e a turbidez dos rejeitos de mineração.

Para Nasiha e Shanmugam (2018), um modelo que combine as propriedades físicas, ópticas e hidrodinâmicas das partículas marinhas e do meio foi utilizado em águas estuarinas e costeiras para prever a velocidade de sedimentação baseada na Lei de Stokes, representada na Equação 3.5, fornecendo uma fórmula que considere os efeitos do tamanho, forma e densidade de grãos e as características do meio. A velocidade de sedimentação é significativamente influenciada pela forma das partículas, onde  $C_d$  é o coeficiente de resistência aerodinâmica,  $Re$  é o número de Reynolds,  $CSF$  é o fator de forma de Corey.

$$C_d = \frac{x}{Re} + \frac{5,5677}{e^{2,314CSF}} + 0,853 \ln(CSF) - 0,1635 \quad 3.5$$

### 3.7 PROCESSO DE COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO

Existe um diferencial muito importante no comportamento de um coagulante frente a um flocculante. A coagulação (uso de sal de alumínio e ferro) é um processo químico que envolve a neutralização da carga, enquanto a floculação (uso de flocculante com carga



relativa muito alta e peso molecular alto) é um processo físico e não envolve a neutralização da carga. Na coagulação tradicional usa-se coagulantes de alumínio e ferro. Os coagulantes de alumínio mais comuns são sulfato de alumínio e os coagulantes de ferro incluem o sulfato ferroso. Já os floculantes como poliacrilamidas se tornam seguros para sua utilização na floculação, um floculante orgânico de bom peso molecular com excelentes resultados para clarificação e espessura da lama.

A coagulação é um processo que ocorre muito rápido, em questão de frações de segundo, que tenta diminuir ou neutralizar a carga negativa em partículas coloidais em suspensão. Isso permite que a força de atração de Van der Waals incentive a agregação inicial de materiais coloidais e finos em suspensão para formar microflocos. Uma mistura rápida e de alta energia é necessária para garantir que o coagulante seja totalmente misturado no fluxo do processo para maximizar sua eficácia (Koohestanian *et al.*, 2008).

A coagulação é uma das principais e antigas técnicas de tratamento, ela e a floculação, usadas para melhorar a eficiência geral do tratamento e a relação custo/benefício para o tratamento de água. Torna-se importante uma exploração das propriedades dos flocos e introdução de esquemas práticos para o controle da dose de coagulante (Jiang, 2015). O uso de coagulantes ainda é sinônimo de desafios ambientais e pesquisa. Atualmente, materiais naturais e ecológicos são estudados e uma revisão abrangente no desempenho operacional é um dos desafios do uso dos coagulantes (Oladoja, 2016).

Geralmente, os sulfatos de alumínio e ferro (II) são os principais coagulantes usados nesse processo, devido aos íons metálicos que possuem (carga positiva) e da sua atividade numa solução aquosa. Nessa interação química origina-se a hidrólise e seu produto são as espécies hidrolisadas, que consiste na formação de ligações com os átomos de oxigênio provocando a liberação de átomos de hidrogênio, tornando a suspensão ligeiramente ácida (Libânio, 2005, 2010).

A adição de uma substância que ajuda no processo de sedimentação chamada em geral de floculante é o iniciador do processo de floculação, sendo útil para aumentar a velocidade de sedimentação, consequentemente, a decantação das partículas é mais rápida, tendo como um dos efeitos esperados uma velocidade de separação dos sólidos e da água maior do que o normal. No caso do adensamento de rejeitos de mineração, esse

experimenta dois estágios nesse processo, a sedimentação e uma compactação; o floculante adicionado aumenta significativamente a taxa de sedimentação, porém a taxa de compactação pode ser menor, acontecendo uma consolidação final pouco desejada (Salama *et al.*, 2015; Qi *et al.*, 2018).

No tratamento de efluentes industriais vem se utilizando coagulantes ou floculantes devido à sua inércia natural, às alterações de pH, à alta eficiência com o uso de baixa dosagem além do fácil manuseio. No entanto, os floculantes orgânicos estão preocupados com eficiência sistemática e vida útil curta, enquanto os floculantes inorgânicos têm as principais dificuldades no meio ambiente, mostrando um comportamento desfavorável na biodegradabilidade. A fim de combinar as suas melhores propriedades, esses enxertos são sintetizados e estudados gradativamente no tempo (Singh *et al.*, 2000; Lee *et al.*, 2014).

Radoiu *et al.* (2004) fala que a missão de remover as partículas coloidais das águas residuais tem proporcionado que várias tecnologias tradicionais e de vanguarda sejam utilizadas para remover as partículas coloidais das águas residuais; tais como troca iônica, filtração por membranas, flotação, precipitação, extração por solventes, adsorção, floculação, coagulação, métodos eletrolíticos e até biológicos; sendo a sedimentação por floculação uma das técnicas mais utilizadas e de menor custo para tratamento de água.

De acordo com Bratby (2006), sólidos suspensos muito finos dissolvidos, metais e outras impurezas estão presentes nas águas residuais produzidas a partir de diferentes tipos de indústrias como a mineração. Devido à granulometria muito fina das partículas e à presença de carga superficial, a responsabilidade de aproximar essas partículas para tornar a massa mais pesada para um adensamento ótimo sempre tem sido um desafio, acontecendo que o floculante é a chave na aplicação da técnica de sedimentação por floculação.

Para Witham (2017), o uso de floculantes em pó seco, compostos consistindo em inorgânico e orgânico, tem sido convenientemente utilizados nos processos de floculação de pequenas suspensões de volume; isto é, os floculantes em pó seco compostos são adicionados diretamente a uma suspensão. À medida que a dosagem de floculante inorgânico é aumentada, a dosagem adequada do floculante orgânico iônico também é aumentada para uma melhor remoção de turbidez e o processo de floculação.

Entre essas combinações de dosagens de flocculantes inorgânicos e orgânicos, a força do floco em dosagens baixas é menor do que em dosagens altas. Verifica-se também que, nas condições de dosagem de polímero mais elevadas, o lodo flocculado mostra tanto o volume máximo local como o volume local máximo, dependendo da dosagem do flocculante inorgânico, relacionado às variações da morfologia do flocculante orgânico sob várias dosagens de flocculantes inorgânicos.

### **3.7.1 Mecanismos de coagulação e floculação**

Quando polieletrólitos são adicionados a partículas de carga oposta, acredita-se que a atração eletrostática é a principal força motriz para a adsorção e os mecanismos postulados pelos quais os polieletrólitos podem causar a floculação são modelos de pontes, neutralização de carga ou adesivos eletrostáticos.

Segundo O'Melia (1972), um flocculante é uma cadeia de pequenas subunidades, diferentes flocculantes podem provocar a falta de estabilidade dos colóides de várias maneiras. Aliás, dependendo das circunstâncias sob as quais essas substâncias são utilizadas, podem agir como flocculante ou como auxiliares da floculação, e podem realizar a falta de estabilidade coloidal por mais de um procedimento.

Kawamura (1976), afirmava que o uso de flocculante já era realidade há aproximadamente 30 anos, assim, atualmente há aproximadamente 75 anos. A obtenção de água potável é o principal foco no uso de flocculantes, e nas últimas décadas na indústria da mineração para o desaguamento de rejeitos em estações de tratamento de recuperação de minério. Nessa indústria os processos de sedimentação e filtração para a recuperação da água são muito importantes, sendo que as lamas obtidas a partir dos vários processos de separação ainda possuem grandes níveis de água e devem ser concentradas para reduzir os custos de deslocamento; os flocculantes têm um papel nesse condicionamento de rejeito.

Zhou (2008) assegura que a quantidade de polímero adsorvido e consequentemente a dosagem de coagulante necessária para realizar a desestabilização de partículas coloidais depende da sua concentração. Na faixa de pH testada, o pH inicial apropriado deve ser superior a 7, os polímeros carregados positivamente prevalecerão e a adsorção desses polímeros positivos pode desestabilizar os colóides carregados negativamente por

neutralização de carga. Em altas concentrações, um grau suficiente de supersaturação induz à precipitação rápida de uma grande quantidade dos resultados da reação química, para formar “varredura de flocos”.

### **3.7.2 Coagulantes**

Novos compósitos poliméricos de alumínio férrico estão sendo sintetizados. Para obter as condições ótimas de síntese, resultando na eficiência máxima de remoção de turbidez, para avaliar os efeitos interativos no desempenho da coagulação-floculação é utilizada a metodologia de superfície de resposta (RSM, do inglês Response Surface Methodology). Avaliações do processo de coagulação-floculação mostraram que a demanda química de oxigênio (COD do inglês Chemical Oxygen Demand) e a eficiência de remoção de turbidez de 82,8% e 98,2%, foram alcançadas sob condições ótimas, apresentando um forte desempenho de coagulação e floculação (Zhu *et al.*, 2012).

Os coagulantes químicos são soluções ácidas de sais inorgânicos de alumínio ou ferro em formas oxidadas, combinados com fosfatos, os íons desses metais são atraentes e as partículas do material sofrem depois precipitação e sedimentação. De uma maneira descontrolada e rápida acontece a hidrólise dos sais de alumínio e ferro, formando uma gama de espécies de hidrólise de metais. Os flocos de agregados são formados com uma grande área superficial específica, este, como um efeito dos processos de pós-coagulação/floculação. A grande massa resultante promove a sedimentação por gravidade para os sedimentos do fundo e a absorção de contaminantes é muito eficaz devido à grande área de absorção (Rybak *et al.*, 2017).

#### ***Sulfato de alumínio***

Para Kadooka (2017) o sulfato de alumínio, também conhecido como alúmen, é um dos primeiros e principais compostos inorgânicos usados no processo de coagulação/floculação de suspensões coloidais. Seu mecanismo de coagulação para rejeitos de fosfato é estudado nesta tese, pois historicamente é o mais amplamente aceito e utilizado na indústria de tratamento de águas residuais (O'Melia, 1972; O'Melia *et al.*, 1999). O sulfato de alumínio tem uma densidade de 2.67 g/cm<sup>3</sup> apresentado

estruturalmente na Figura 3.9, pode ser produzido pela dissolução de hidróxido de alumínio,  $Al(OH)_3$ , em ácido sulfúrico,  $H_2SO_4$ .

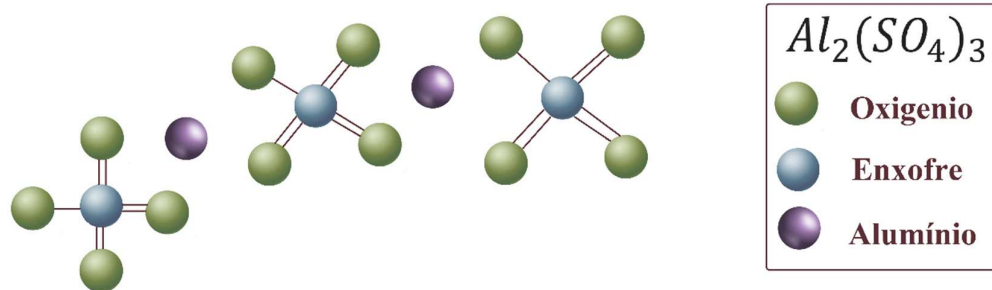


Figura 3.9 - Estrutura química do sulfato de alumínio

A Equação 3.6 mostra a reação química que dá origem a este sal, e a Figura 3.10 mostra o sulfato de alumínio, quando dissolvido em água.

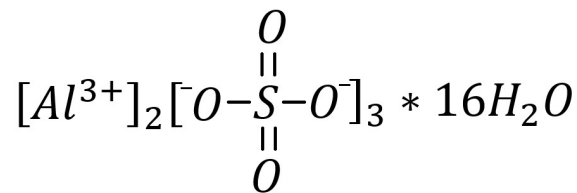
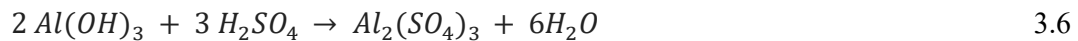


Figura 3.10 - Sulfato de alumínio, quando dissolvido em água

Dolejs (1989) afirma que o sulfato de alumínio parcialmente neutralizado (PNAS, do inglês Partially Neutralized Aluminium Sulphate) foi testado em laboratório e em experimentos em escala real. Parece ser uma boa alternativa ao alúmen no tratamento de águas de baixa alcalinidade, mostrando uma melhor eficiência de remoção do que o alumínio, bem como menores concentrações residuais de Al, enquanto a eficiência dos tanques de sedimentação aumentou em cerca de 20%.

A adsorção de íons de monofosfato de soluções aquosas formados por meio de flocos pré-formados a partir de alúmen por:

- Hidrólise de sulfato de alumínio e um alúmen básico.
- Ligação iônica de fosfato.
- pH constante.

É um resultado de interações específicas, envolvendo transferência de  $H^+$  ou  $OH^-$ . Na prática, esses comportamentos diferentes podem ser importantes na determinação da eficiência geral da remoção de fosfato em alumínio em processos de coagulação-floculação-sedimentação (Boisvert, 1997).

Esses polímeros são adsorvidos em partículas coloidais e a quantidade de polímero adsorvido e, conseqüentemente, a concentração do sal de sulfato de alumínio necessária para realizar a instabilidade das partículas coloidais depende, então, do teor de sólidos. Os polímeros carregados positivamente prevalecerão e a adsorção desses polímeros positivos pode desestabilizar os colóides carregados negativamente por neutralização de carga, quando o pH estiver abaixo do ponto de carga zero do hidróxido de Al. Em altas doses do sal, um grau suficiente de supersaturação induz à precipitação com grande velocidade de uma fração considerável de hidróxido de alumínio (Zhou, 2008).

### ***Sulfato de Ferro***

Utilizado como coagulante inorgânico, ele também demonstra ter boas propriedades em aplicação auxiliar para remediar solos contaminados mediante a redução da solubilidade do As e Cu perturbados pela mineração (Fresno *et al.*, 2016). O sulfato de ferro tem uma densidade de  $2,84 \text{ g/cm}^3$ , apresentado estruturalmente na Figura 3.11.

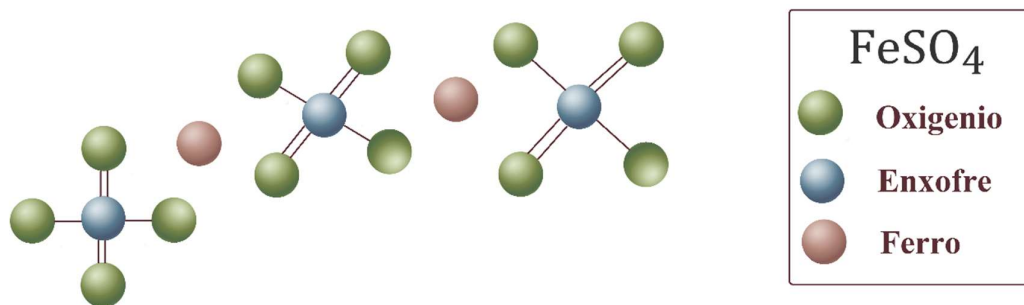
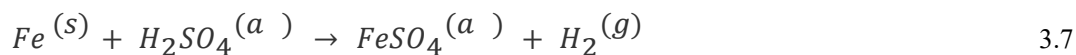


Figura 3.11 - Estrutura química do sulfato de ferro (II)

Pode-se obter da reação do ferro livre o ácido sulfúrico, como mostra a Equação 3.7, e a Figura 3.12 mostra o sulfato de ferro (II), quando dissolvido em água.



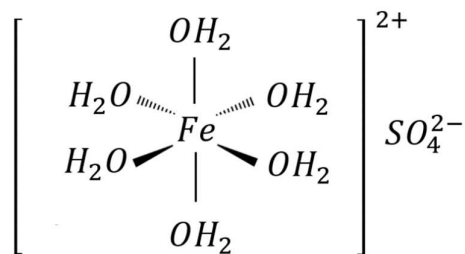


Figura 3.12 - Sulfato de ferro (II), quando dissolvido em água

Conforme Cooke *et al.* (2005), quando utilizado coagulante com alta concentração de ferro como um dos métodos de controle e manejo de reservatórios naturais e artificiais, ele apresenta uma tonalidade castanha escura e tem uma existência durante um período na água até que a precipitação dos fosfatos tenha terminado, após o que ocorre a sedimentação dos flocos de agregados recém-criados, sendo a sedimentação por gravidade para estes flocos.

Segundo Rybak (2017), um dos métodos populares adotados para o restabelecimento das condições normais de depósitos naturais que contém permanentemente uma quantidade variável de água é a inativação química de fosfatos usando coagulantes de ferro. A aplicação de sulfato de ferro geralmente causa alterações na disponibilidade de luz devido a mudanças na cor da água e turbidez. Embora a mudança nas propriedades ópticas da água seja em um período de pouca duração, a inativação de fosfatos e a precipitação secundária de ferro com outros íons dissolvidos em água produzem uma suspensão coloidal colorida.

### 3.7.3 Flocculantes orgânicos

Há mais de meio século, estudos sobre flocculantes orgânicos ou chamados de flocculantes poliméricos foram iniciados (Gregory, 1973) e têm encontrado uma ampla aplicação em uma variedade de campos, geralmente uma análise empírica é desenvolvida para a escolha do polímero em qualquer caso particular. No caso importante de floculação de partículas por polímeros de carga oposta, por exemplo, a neutralização de carga pode desempenhar um papel significativo, ou mesmo dominante. Na floculação de suspensões de poliestireno por polímeros catiônicos, tanto a ponte como a redução de carga podem ser importantes para um polímero de alto peso molecular, mas que um polímero de menor

peso molecular (cerca de 20.000) é inteiramente efetivo em virtude de sua carga positiva.

Zhou e Franks (2006) asseveram que os polímeros podem melhorar significativamente os processos de separação de líquidos e sólidos, e estão sendo usados cada vez mais em uma ampla variedade de indústrias, principalmente na recuperação de minerais e desaguamento de rejeitos. A floculação de partículas de sílica de 90 nm de diâmetro pela adição de polímeros catiônicos carregados de maneira diferente resulta na formação de flocos com características distintas, determinadas principalmente pelas condições de floculação, incluindo a dose de polímero, a concentração de sólidos.

Para Moody (2007), as partículas passam por um processo de adsorção dos polímeros, acontecendo a floculação, seguido por um processo de ligação de cadeias poliméricas entre partículas e/ou neutralização de carga das partículas, também na suspensão coloidal, quando é agregado a solução de polímero floculante, o modo de adição pode afetar a propriedade de floculação resultante. Um processo de floculação depende fortemente da quantidade e morfologia da molécula de polímero adsorvente.

O cuidado ao ambiente e a capacidade de biodegradabilidade como benefício do uso dos floculantes à base de biopolímeros têm mostrado interesse nos pesquisadores, porém a sua eficiência moderada de floculação e menor prazo de validade, além da necessidade de utilizá-lo em grandes doses para o processo. Uma combinação dos polímeros com os floculantes inorgânicos está sendo estudada visando aproveitar as melhores propriedades de ambos, polímeros sintéticos são enxertados na espinha dorsal de polímeros naturais para obter floculantes enxertados sob medida (Lee *et al.*, 2014).

### ***Polímero***

Colic (2011) fala que o floculante granular de poliacrilamida disponível na forma GRAS (do inglês Generally Recognized as safe) o torna seguro para utilização. O floculante possui uma densidade aparente de 0,75 kg/l e pH que varia de 3 a 5 em solução de 0,5% (25°C) e uma viscosidade de 170 até 2000 (cp/mPa.s) para uma temperatura de 25°C. Esse floculante orgânico apresenta um alto peso molecular catiônico (55%), com excelentes resultados para clarificação e espessura da lama.



De acordo com Xiong (2018), esse polímero catiônico altamente eficaz condiciona efetivamente os sólidos para operações de desidratação e auxilia nos processos de clarificação da água, além de mostrar um desempenho excepcional em separações sólido-líquido sob uma ampla gama de condições. O polímero está constituído quimicamente pela poliacrilamida a partir de subunidades denominadas monômeros de acrilamida a (-CH<sub>2</sub>CHCONH<sub>2</sub>-), sendo um homopolímero de acrilamida, absorve a água com facilidade, tornando-o na prática um hidrogel (Figura 3.13).

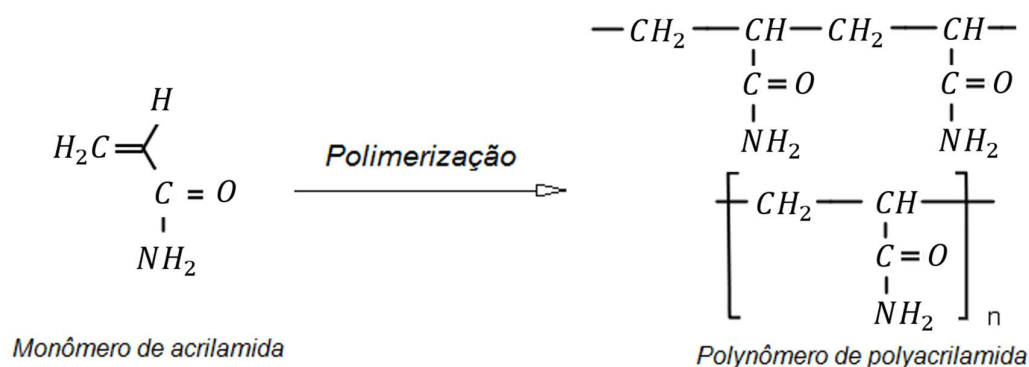


Figura 3.13 - Polimerização da poliacrilamida

Um floculante eficiente (em economia e em dosagem) tem mostrado grandes vantagens como uma rápida clarificação da água melhorando a qualidade da água e reduzindo os sólidos em suspensão pelas elevadas taxas de sedimentação, também possibilita um fluxo descensional mais claro e de maior caudal pela sua facilidade de ser solúvel, consegue aumentar a propriedade de filtrado da água e seu caudal, seu pH não mostra uma mudança significativa no pH da solução.

## CAPÍTULO 4

### PROGRAMA EXPERIMENTAL

#### 4.1 INTRODUÇÃO

O material em estudo é oriundo de um sistema que abrange a utilização de água captada no mar e tratada pelo processo de osmose inversa para diminuir o conteúdo de sais, para o processo de beneficiamento do minério fosfático, que consiste em bombeá-la para uma planta de dessalinização situada no complexo; depois de bombeada e transportada até a planta concentradora por tubulações de polietileno, a uma distância de cerca de 40 km. A água do mar é armazenada em reservatórios de decantação, para remoção da areia, e posteriormente bombeada para a realização do processo de osmose reversa para a separação do sal. Parte do sistema de beneficiamento do minério faz uso da água dessalinizada, de modo específico nos filtros, e em outros procedimentos utiliza-se a água do mar sem tratamento.

Para CMMM (2017), o objetivo principal da mina de fosfato é a exploração e concentração de fosfato do depósito mineral maior da América do sul, tendo como componentes a mina, planta concentradora, rodovia industrial, zona de descarga de caminhões, correia transportadora zona de secagem e armazenamento, porto, linha de impulsão de água de mar e linha de transmissão. O processo é apresentado em um diagrama de fluxo (Figura 4.1). Sendo as etapas de desenvolvimento para o minério:

- Britagem primária;
- Cilindro de lavagem;
- Peneiramento primário;
- Hidrociclone primário;
- Cilindro de abrasão;
- Peneiramento secundário;
- Hidrociclone secundário;
- Correia de filtro;
- Secador.

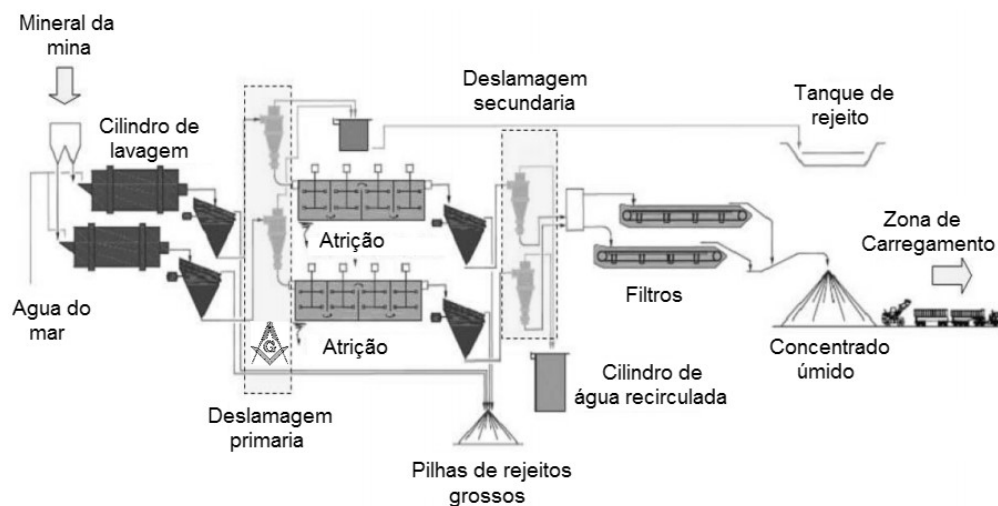


Figura 4.1 - Processamento de rocha fosfatada em Bayovar (Adaptado de Cabezas, 2016)

O rejeito fino estudado é oriundo de uma operação de hidrociclone que consiste no bombeamento da polpa de minério fosfático em sua entrada de alimentação, o minério é separado por tamanho com o material fino saindo, o que é denominado como *overflow*, que é a rocha finamente moída. Quando a lama está sendo separada por tamanho de moagem, densidade ou conteúdo mineral, neste caso, é o tamanho da partícula. O *underflow* do ciclone é direcionado para o moinho de bolas - para posterior trituração. Uma vez que o minério tenha passado por este moinho, ele será adicionado de volta ao material que está sendo bombeado para o ciclone para reclassificação.

Pereira (2017) diz que dois processos de separação por vibração horizontal acontecem de modo simultâneo com o material originário da britagem primária, para o procedimento de alimentação dos cilindros de lavagem. Precedente ao cilindro de lavagem se realiza a separação primária com a água do mar, o material retido, com um tamanho dos grãos acima de 6 mm, é encaminhado para o cilindro de lavagem. O material que passou pela desagregação do cilindro de lavagem dissolvido em água salgada é utilizado para um segundo período do processo de peneiramento. Depois o material com tamanho dos grãos inferior a 6 mm é transportado à bateria de hidrociclones. Com material retido neste processo começa a primeira concepção de rejeitos grossos.

O minério originário dos separadores primários que passaram pela peneira com abertura de 6 mm é selecionado pelos hidrociclones de verídica eficiência. Os rejeitos finos com um teor de sólidos em torno de 15% são separados nos hidrociclones onde é utilizada a

água salgada para diluir a alimentação deles, para depois serem diretamente bombeados aos tanques de contenção. Nos separadores de alta frequência se verte a outra parte do material, e o material de diâmetro inferior a 0,8 mm é transportado aos hidrociclones secundários, que do mesmo modo retêm rejeitos grossos para a etapa dois. Estruturas para a disposição dos rejeitos grossos são originadas pelos processos de seleção primária quanto da geração secundária que foram transportadas em correias, garantindo a estabilidade da pilha em longo prazo deste material.

Providencia-se uma lavagem do concentrado com a água dessalinizada e o desaguento do concentrado de apatita mediante as correias. Uma planta de dessalinização, cuja água é destinada exclusivamente aos filtros, é utilizada para a lavagem do concentrado e ocorre em três etapas, suficientes para redução do teor de cloretos solúveis a níveis relativamente aceitáveis. O concentrado lavado é trasladado por uma correia ao pátio de concentrados para acontecer depois o carregamento do produto, com teor de umidade em torno de 15%, incluindo até 700 ppm de cloretos, e no início transportado por caminhões tipo 'bitrem', por meio de uma estrada industrial com extensão de 32 km, e disposto em estruturas de disposição, tipo pilhas, para acontecer depois o envio à planta de secagem.

As correias transportadoras dão origem à segunda etapa do transporte, realizada a uma distância de 5,5 km, os secadores rotatórios localizados na planta de secagem são alimentados pelo material depositado em tanques de recepção. Na planta de secagem, o fosfato concentrado com umidade média inicial de 15%, atinge uma umidade de 3%, por meio de dois fornos rotativos de gás natural e, em seguida, posto em um lugar adequado como são os silos. Finalmente uma correia transportadora leva os concentrados de fosfato até o porto. Um mapa, destacando as linhas é mostrado na Figura 4.2.

Uma alternativa vanguardista para ser utilizada seria o Espessador de alta densidade Cônico, esse equipamento apresenta um alto desempenho com objetivo da reciclagem de água do processo, espessamento de suspensões e redução do volume de lodo. Os flocos de macro são criados devido à rota de fluxo da polpa de alimentação floculada em contracorrente para as partículas sedimentadas na zona de filtragem, obtendo uma alta concentração de lodo consistentemente estável y uma alta taxa de carga por unidade de área de assentamento e menores diâmetros de espessantes em comparação com os clássicos espessantes estáticos.

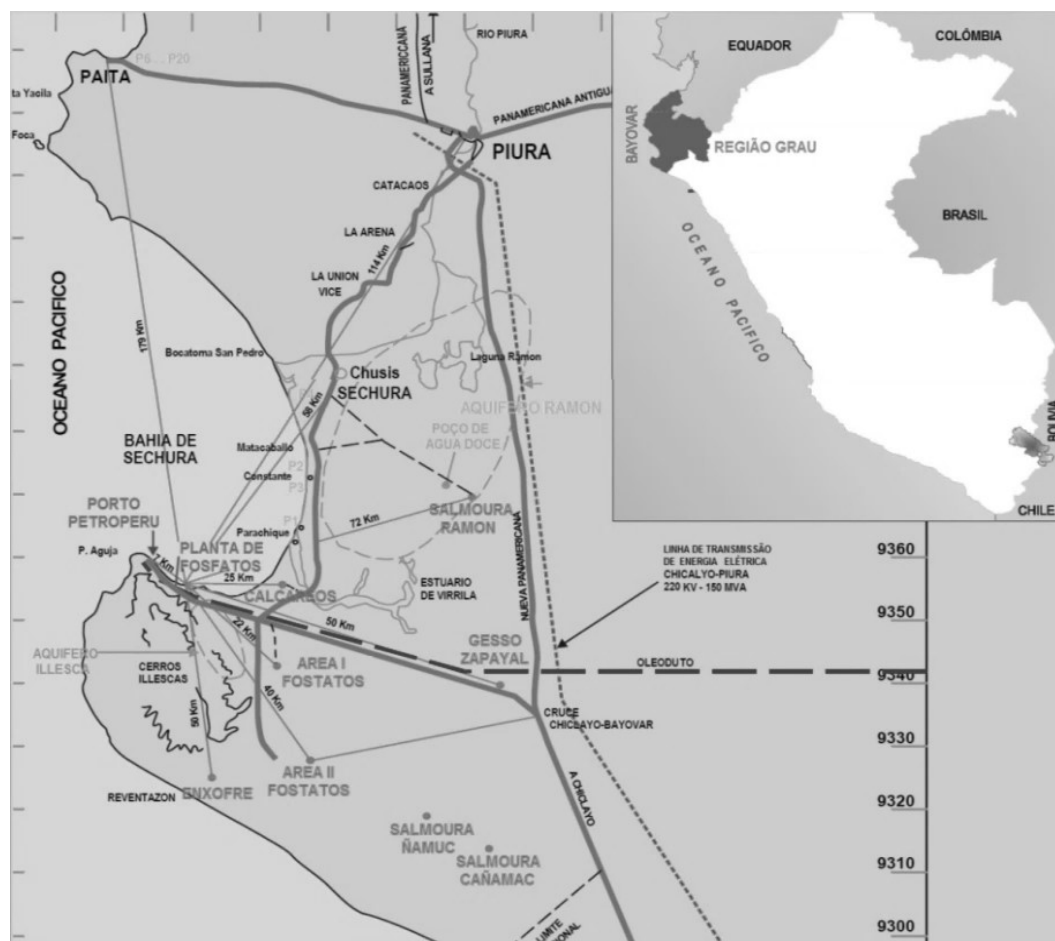


Figura 4.2 - Mapa da Região Grau destacando Sechura e as linhas de transporte da mina até o porto (Adaptado de CMMM, 2017)

Os coagulantes e floculantes que foram utilizados como parte do programa experimental realizado no Centro Tecnológico de Geotecnia Aplicada (CTGA), apresentaram vantagens significativas na velocidade de sedimentação e uma influência considerável no processo de adensamento. Para isso, as concentrações em ppm dos agentes que formam os flocos foram determinadas por experiências em campos de pesquisas prévias com materiais similares e fornecem uma visão geral do desempenho dos principais coagulantes e floculantes. Esse desempenho na sedimentação (mensurado nos ensaios de coluna com o uso de provetas de 1000 ml que permite realizar efetivamente o cálculo da velocidade de sedimentação) e a influência no adensamento (mensurada nos ensaios de adensamento induzido por percolação que permite trabalhar melhor, obtendo relações constitutivas de índices de vazios x tensões efetivas e índices de vazios x permeabilidade dos materiais depositados (Cançado, 2010). Um resumo gráfico com a conceitualização das atividades de laboratório é mostrado na Figura 4.3 apresentando uma padronização.

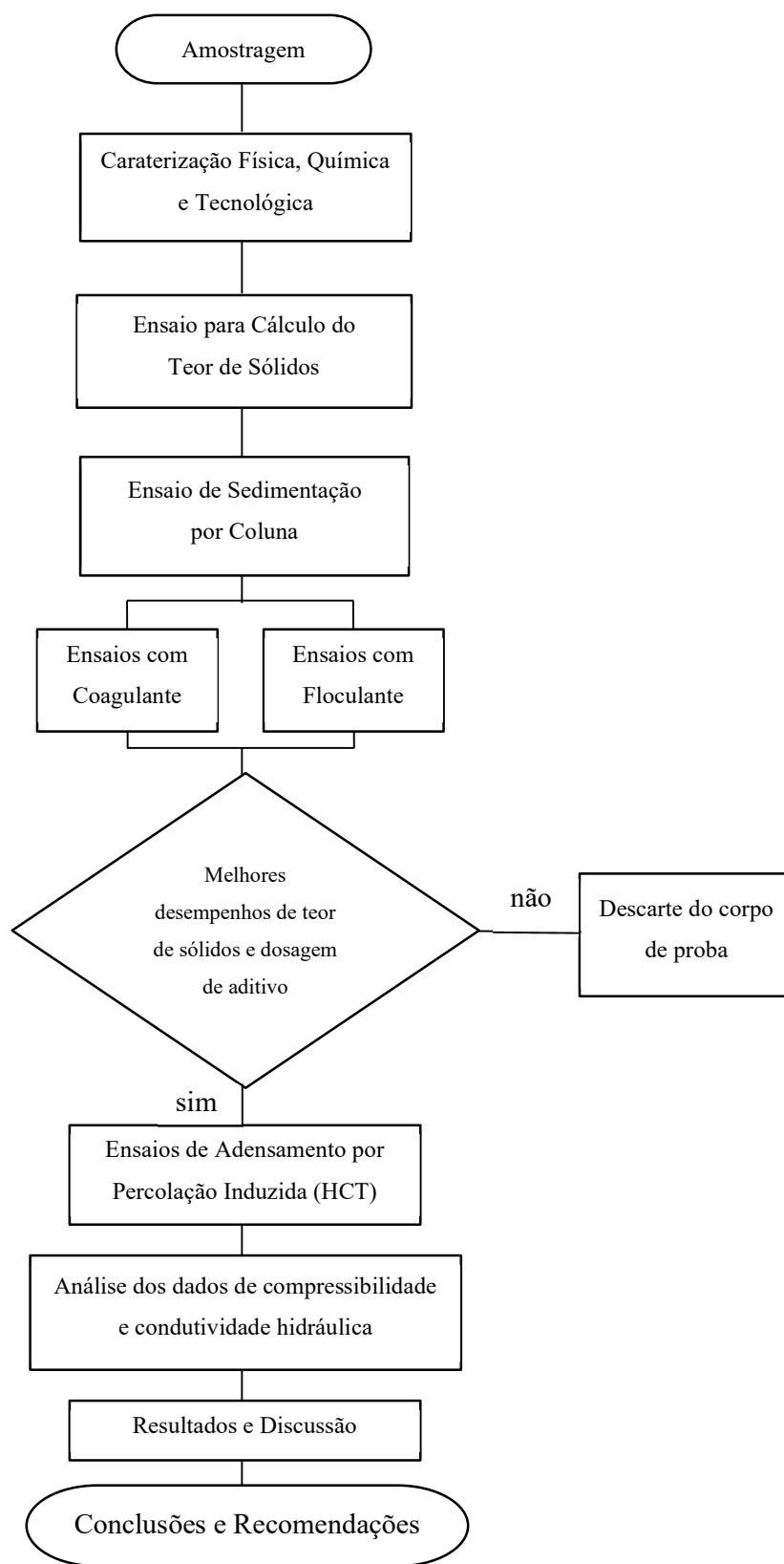


Figura 4.3 – Fluxograma de atividades desenvolvidas na metodologia proposta

## 4.2 PROPRIEDADES DO REJEITO

A amostra do resíduo produzido na etapa do beneficiamento do minério foi coletada diretamente no sistema de lançamento, a qual recebeu uma orientação de caminho para a deposição nos tanques de armazenamento. O rejeito amostrado diretamente do lançamento aos tanques foi transportado desde o Bayovar, Peru, por meio marítimo até o Brasil, via o Porto de Santos em embalagens cilíndricas plásticas com uma capacidade volumétrica de 50 litros, sempre procurando preservar as características “in situ” com um teor de sólidos em uma faixa de 15% a 16% - DSF (*dry salts free*), teor oriundo da flotação (Pereira, 2017).

Para garantir que a amostra no laboratório possua o mesmo teor de sólidos daquele “in situ”, foi iniciada a metodologia estandardizada mediante a execução do ensaio para determinar os valores de teor de umidade e de sólidos dos rejeitos de todas as embalagens cilíndricas. Foi observada uma leve diferença entre as amostras, com teores de sólidos ( $S_w$ ) entre 13,14% e 15,53%, e uma média de 14,17% e os teores de umidade ( $w$ ) em uma faixa de 543,8 e 662,1%, e uma média de 608,5%. Para garantir os teores foram homogeneizadas colocando a mesma água do rejeito mantendo a salinidade.

Pereira (2017), em seu trabalho definiu a massa específica dos grãos, baseou-se na norma internacional ASTM D-854 (ASTM, 2014) e as respectivas frações granulométricas foram definidas a partir da NBR 6502 (ABNT, 1995). A distribuição dos tamanhos dos grãos foi estabelecida mediante a classificação granulométrica da amostra obtida em campo baseada na NBR 7181 (ABNT, 2018). A Figura 4.4 representa os diferentes ensaios realizados no granulômetro a laser considerando o uso do Hexametáfosfato. Já a BS-1377 (BSI, 1975) desenvolve o limite de plasticidade obtido através do Cone de Penetração. Todos os resultados dos ensaios descritos são apresentados na Tabela 4.1, dados que foram utilizados nesta pesquisa.

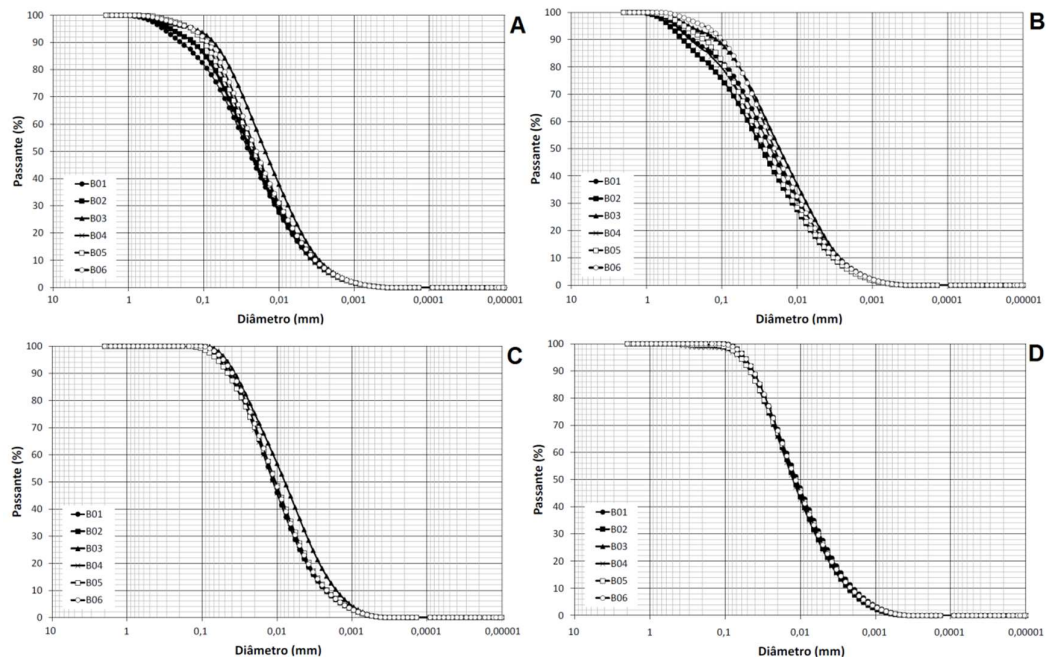


Figura 4.4 – Curvas granulométricas das amostras obtidas com o granulômetro a laser: A, sem hexametafosfato e sem sonar. B, com hexametafosfato e sem sonar. C, sem hexametafosfato e com sonar. D, com hexametafosfato e com sonar

Tabela 4.1 – Propriedades físicas do rejeito	
Índice Físico	Valor
Massa específica dos grãos	2,31 g/cm <sup>3</sup>
Índices de vazios iniciais	15,67
Limite de Plasticidade (ABNT)	40 – 41 %
Limite de Liquidez (ABNT)	75 – 74 %
Índice de Plasticidade (ABNT)	35 – 33 %
Limite de Liquidez (BS)	85 – 87 %
Índice de Plasticidade (BS)	44 – 47 %

Cabe indicar que, de acordo com as experiências no CTGA do NUGEO, os ensaios para achar os valores dos Limites de Consistência do rejeito fino, baseados nas normas nacionais, o Aparelho de Cone apresenta melhores resultados do que o Aparelho de Casagrande incluso. Os dados apresentados do LL e IP para ambos os métodos apresentaram um diferencial de 2% o que torna interessante colocá-los.



### 4.3 ANÁLISES QUÍMICA E MINERALÓGICA

#### 4.3.1 Generalidades

A plataforma continental do norte peruano tem sedimentos superficiais ricos em glauconia (mineral cromóforo), pertencente ao grupo dos invertebrados gastrópodes e que são abundantes nas formações cretáceas e estão compostas de carbonato cálcicos. Foram realizados estudos com o uso dos isótopos de urânio e tório nos fósforos sedimentares do fundo do mar de Sechura para estabelecer a idade para obter indícios para o seu modo de formação. As composições química e mineralógica dos nódulos de fosforito refletem graus variados de diluição do material fosfático, fluorapatita, por outros minerais autogênicos, e vários componentes alogênicos. O fosforito e diatomita são altamente uniformes em grandes áreas, já o arenito e os tufos formam uma parte pequena, existindo diferenças marcantes em tamanho, forma e densidade (Burnett e Veeh, 1977; Burnet, 1977; Cheney *et al.*, 1979; Bech *et al.*, 2010; Arthur e Dean, 2013).

#### 4.3.2 Análise Química

Ensaio de espectrometria de absorção atômica ou através de técnicas espectroquímicas como, por exemplo, o ensaio de plasma de acoplamento indutivo (ICP), do inglês *Inductively Coupled Plasma*, com uma melhor precisão dos seus resultados, com a vantagem de analisar muitos elementos em simultâneo e em níveis tão baixos que atingem valores de 1-10 ou ppb foram realizados para uma análise química desses rejeitos.

A Companhia Mineira Miski Mayo (CMMM, 2017) realizou ensaios de espectrometria para as análises que são apresentadas na Tabela 4.2, os resultados mostram a presença majoritária de SiO<sub>2</sub> em um 61,6%; em menor escala, de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, CaO e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, com um total de 23,4%. Dentro de outros elementos foram achados Cd, F, Cl, Na<sub>2</sub>O, e K<sub>2</sub>O com um total de 10,5%.

Tabela 4.2 – Resultados da análise do componente da amostra (%w<sub>t</sub>)

Componentes	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Outro
							s
Fração de massa (%)	7,2	9,3	61,6	1,7	6,9	2,8	10,5

### 4.3.3 Análise mineralógica

A análise mineralógica foi realizada por meio de microscópio eletrônico de varredura (MEV), equipamento capaz de produzir imagens de alta ampliação e resolução da superfície da amostra, bem como por equipamento de difratometria de raios-X, todos pertencentes ao Laboratório de Microscopia Eletrônica e Análise de Imagem (NanoLab), da Escola de Minas/UFOP. Através dos resultados, destaca-se a presença de partículas de halita (H), bassanita (BA), biotita (BI), quartzo (Q) fluorapatita, com óxidos de silício não superiores a 50 micras, um valor de estimativas. Considerando a totalidade da análise, estes últimos representam um teor de quase 60%, presença bastante significativa. O difratograma de raios-X é mostrado na Figura 4.5.

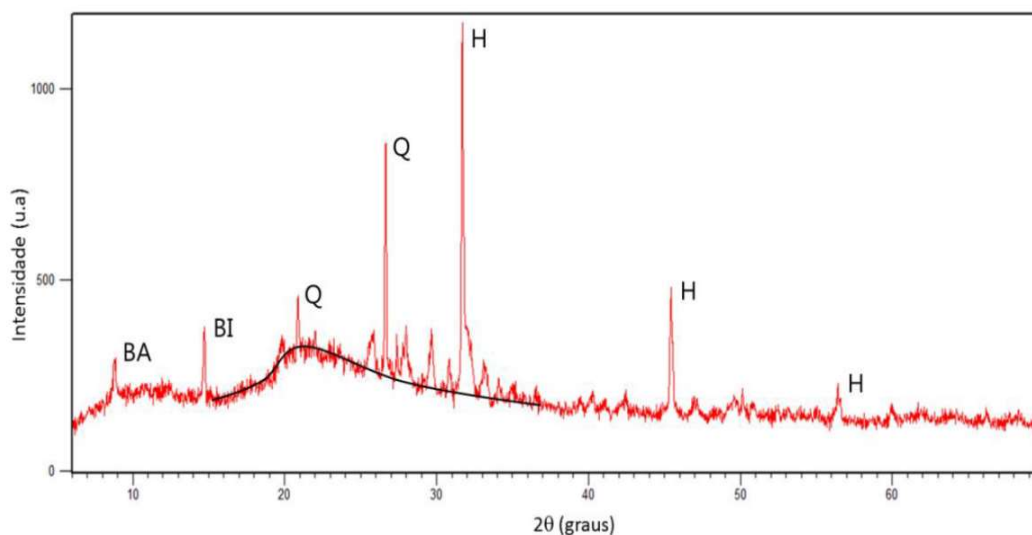


Figura 4.5 - Difratograma de raios-X do rejeito de fosfato (Pereira, 2017)

Do ensaio da microscopia eletrônica pode se ter um reconhecimento dos fósseis silicáticos presentes no rejeito fino de baixa densidade oriundo de um minério de fosfato (Figura 4.6).

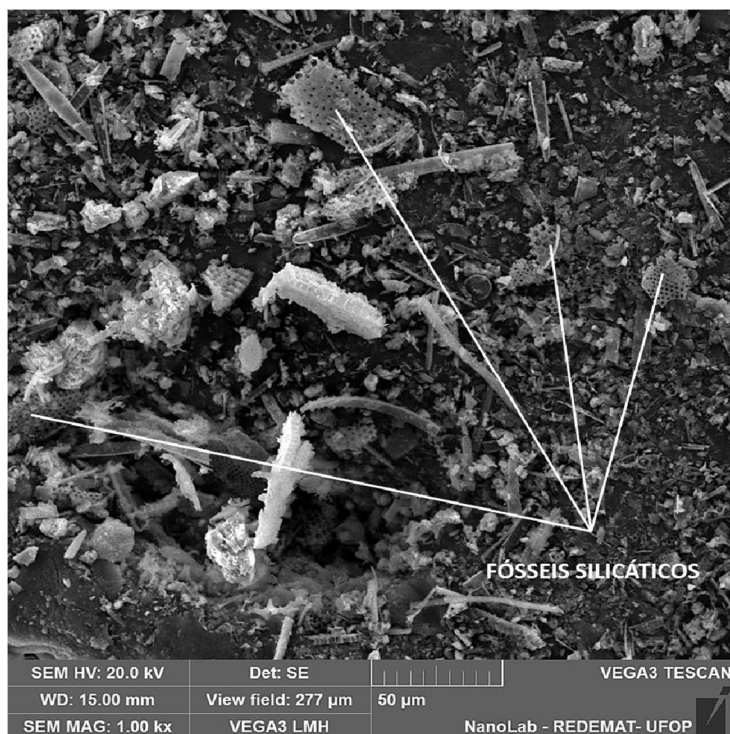


Figura 4.6 - MEV do rejeito de fosfato – aproximação 2000X (Pereira, 2017)

As principais fases foram obtidas por meio da difratometria de raios-X. A presença considerável de fósseis marinhos silicáticos, habituais nas camadas e intercamadas da rocha fosfática, é destacada nas imagens da microscopia. Os fósseis são característicos de plânctons (*Asteromphalus*). As fases observadas na difratometria de raios-X não ficaram tão claras quando analisadas a partir das espectroscópias por dispersão de energia (EDS), do inglês *Energy Dispersive Spectroscopy*.

A Figura 4.7 apresenta um espectro típico obtido nas análises, comprovando a presença de oxigênio, silício e, em menor escala, cálcio, sódio e cloro. Os outros espectros também apresentaram a existência de ferro, alumínio, carbono, magnésio, fósforo e enxofre, todos em baixos percentuais.

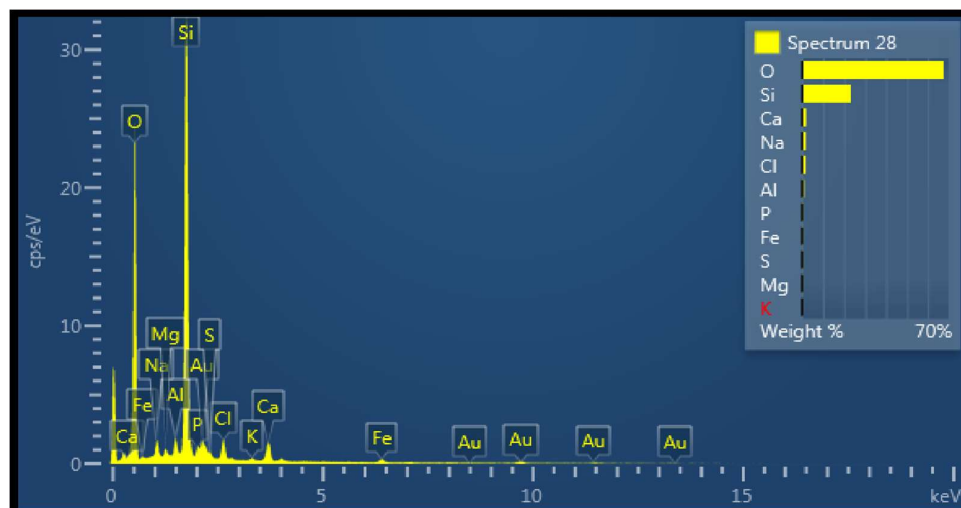


Figura 4.7 - Exemplo de espectro de EDS, NanoLab (Pereira, 2017)

## 4.4 ENSAIOS ESPECIAIS

### 4.4.1 Metodologia padronizada

A metodologia experimental que se fundamenta em três etapas foi necessário conhecer as propriedades físicas dos rejeitos de fosfato mediante a caracterização geotécnica (massa específica dos grãos, granulometria, limites de consistência), como também uma análise química e mineralógica. Foi fundamental conhecer as características dos agentes químicos que auxiliam o estágio de floculação (coagulantes e floculantes. Além disso, uma secagem em estufa do rejeito foi realizada, com o propósito exclusivamente acadêmico, percebendo sua inviabilidade na indústria, para avaliar o seu comportamento pela alteração dos cristais do material, que adquiriram uma maior maturidade e ao serem submersos novamente apresentaram um comportamento muito diferenciado. A metodologia padronizada apresenta pormenorizadamente três etapas que permitiram comparações e avaliações dos parâmetros geotécnicos do rejeito como o teor de sólidos, velocidades de sedimentação, compressibilidade e condutividade hidráulica, na mesma amplitude que os identificados em pesquisas científicas.

#### *Primeira fase: teor de sólidos*

Os teores de sólidos foram selecionados de acordo com os trabalhos de campo que se realizam na mina de fosfato e da experiência tecnológica das pesquisas científicas (Busch, 1987; Gomes, 2009; Barri *et al.*, 2016), considerando então, uma ampla faixa desde 8,5%

a 21% com incrementos de 2,5%, gerando um total de 6 teores de sólidos. Calculados com alta precisão, foi necessário realizar vários ensaios iniciais para obter o teor de sólidos. As amostras foram tiradas diretamente das bombonas selecionadas para cada teor sempre com o cuidado de ter o material todo homogeneizado e cumprindo a norma da ABNT (NBR 6457). Além de serem avaliados constantemente durante as duas seguintes etapas da metodologia para garantir os valores parametrizados e não perderem a credibilidade dos ensaios.

Os resultados nessa fase evidenciam uma tendência congruente, ao se aumentar a massa do rejeito também se aumenta o teor de sólidos para um volume comum de 1000 ml. Esses valores permitiram realizar o gráfico de barras e obter uma linha de tendência, conseguindo dessa forma uma equação em função ao eixo “x” e dando um R-quadrado de 1, que é um excelente ajuste da linha para os dados (Figura 4.8).

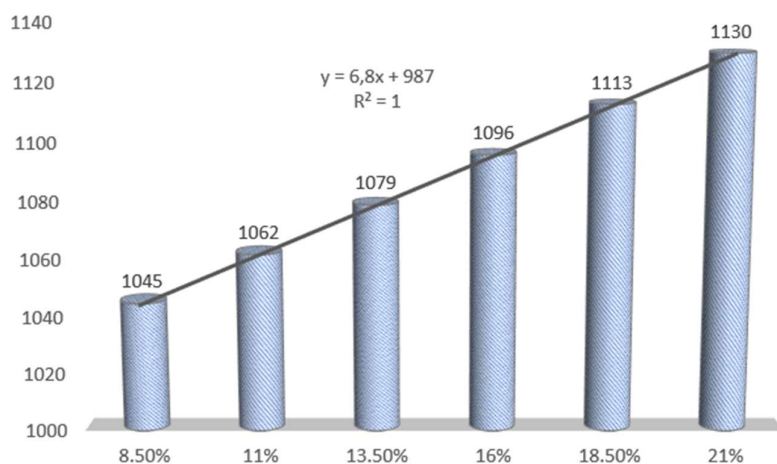


Figura 4.8 – Representação estatística dos valores obtidos da massa do rejeito em 1000 ml e linha de tendência

A equação obtida do gráfico anterior permitiu arranjar a Equação 4.1, colocando o teor de sólidos no eixo “x” e a massa do rejeito de fosfato que se obterá em 1000 ml dependendo do teor de sólidos no eixo “y”. Conseguindo de uma forma rigorosa e técnica os valores necessários para o funcionamento do Macro, a qual se baseia justamente nestes valores para qualquer teor de sólidos.

$$m_{1000ml} = (6,8 * Sw) + 987g \quad 4.1$$

Onde:

$m_{1000\text{ ml}}$  é massa do rejeito contido em uma proveta de 1000 ml, em gramas;

Sw é teor de sólidos do rejeito de fosfato, em porcentagem.

*Macro para o cálculo do teor de sólidos requerido*

Terminado o processo de sedimentação, separação do rejeito em lama e água, para obter um teor de sólidos almejado, baseou-se em um Macro, criado em um editor de planilhas eletrônicas de cálculo, para ser reutilizado no processo de automatização do procedimento. O Macro permite calcular exatamente os volumes de água para retirar quando quiser e aumentar o teor de sólidos, dependendo do valor que se precisa atingir. Por exemplo, deseja-se passar de um teor de sólidos de 16% a 18,5%, a Figura 4.9 mostra um volume negativo de 27,63 cm<sup>3</sup> o que significa que deve ser tirado (*Out*), o que quer dizer em massa um valor de 30,28 g e uma altura que diminuirá em 0,96 cm.

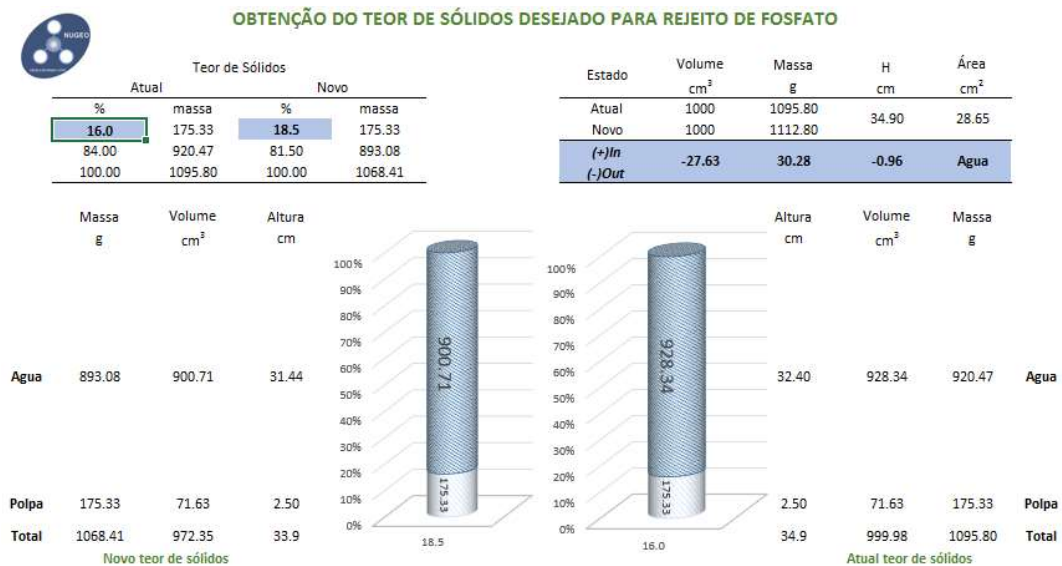


Figura 4.9 – Exemplo do cálculo para aumentar o teor de sólidos de 16% a 18,5%

No caso contrário, se o objetivo é diminuir o teor de sólidos, ou seja, passar de 16% a 13,5%, deve-se aumentar o volume de água. A Figura 4.10 mostra outra das aplicações do Macro que permite saber o valor exato do volume de água que precisa ser aumentado na proveta para poder diminuir o teor de sólidos e atingir o desejado. No exemplo, precisa-se um volume positivo de 27,63 cm<sup>3</sup>, o que significa que deve ser colocado (*In*) em massa um valor de 30,28 g e uma altura que aumentará em 0,96 cm.

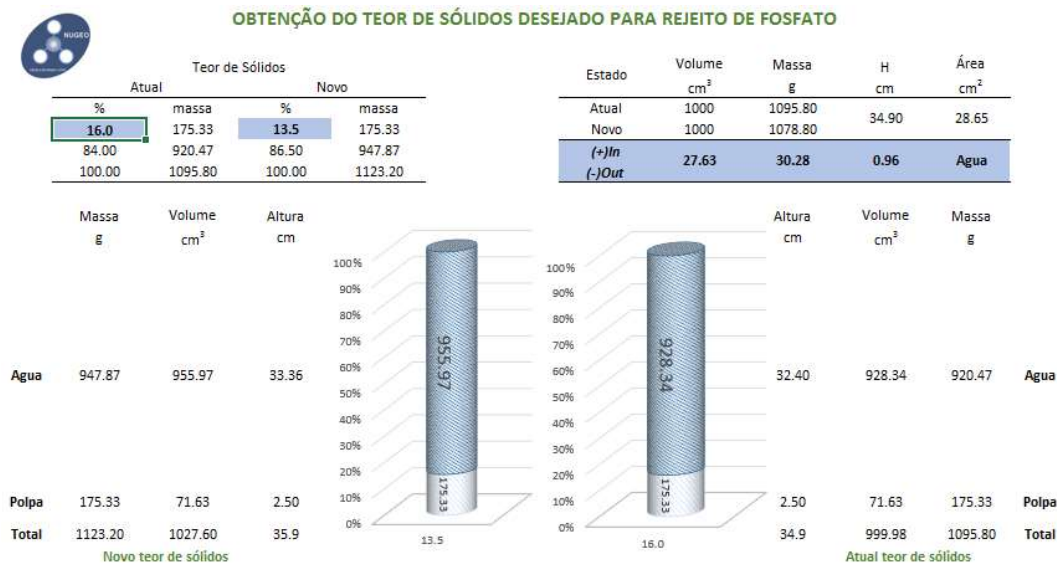


Figura 4.10 – Exemplo do cálculo para aumentar o teor de sólidos de 16% a 13,5%

### ***Segunda fase: sedimentação***

A segunda etapa foi a execução dos ensaios de sedimentação mediante coluna, como foi detalhado no capítulo anterior o procedimento, foram colocadas sete provetas de 1000 ml das quais em seis foram agregadas dosagens diferentes de agentes químicos (coagulantes e floculantes) para auxiliar a etapa de floculação e uma proveta em estado natural do rejeito de fosfato. Esse procedimento permitiu fazer duas comparações, uma visual ao longo do tempo de duração do ensaio, em tempo real, e outra gráfica das curvas obtidas com o uso dos dados analisados, que se mostraram muito competentes entre eles. A obtenção das curvas de interface líquido-sobrenadante-lama com uma representação de boa qualidade, para o cálculo do melhor desempenho em estado natural e com auxílio de agentes químicos para o estágio de floculação foram desenvolvidas.

### ***Terceira fase: compressibilidade e adensamento***

Em base as recomendações de estudos anteriores e as experiências no laboratório do CTGA, a terceira etapa consistiu na realização dos ensaios no aparelho HCT, que permitiram obter as curvas de condutividade hidráulica e tensões efetivas, ambas versus o índice de vazios. Ressalta-se que as curvas com teores de sólidos nos limites das faixas propostas (teores baixos como 8,5% e 11%, assim como teores altos como 18,5% e 21%) apresentam comportamentos afastados dos aplicados em campo, devido ao índice de

vazios. A metodologia atingiu valores muito similares a outros ensaios desenvolvidos sendo indiscutível os valores desde a fase da sedimentação até a fase de adensamento. Assim, destaca-se que os rejeitos de fosfato não podem ser avaliados com base na teoria clássica (Terzaghi e Frölich, 1936) e sim por teorias de adensamento com deformações finitas e a limitação de pequenas deformações (Gibson *et al.*, 1967), que se aplicam adequadamente. A Figura 4.11 apresenta uma relação/comparação das curvas obtidas nas etapas dois e três que foram reproduzidas pela metodologia aplicada desde o cálculo do teor de sólidos (etapa um).

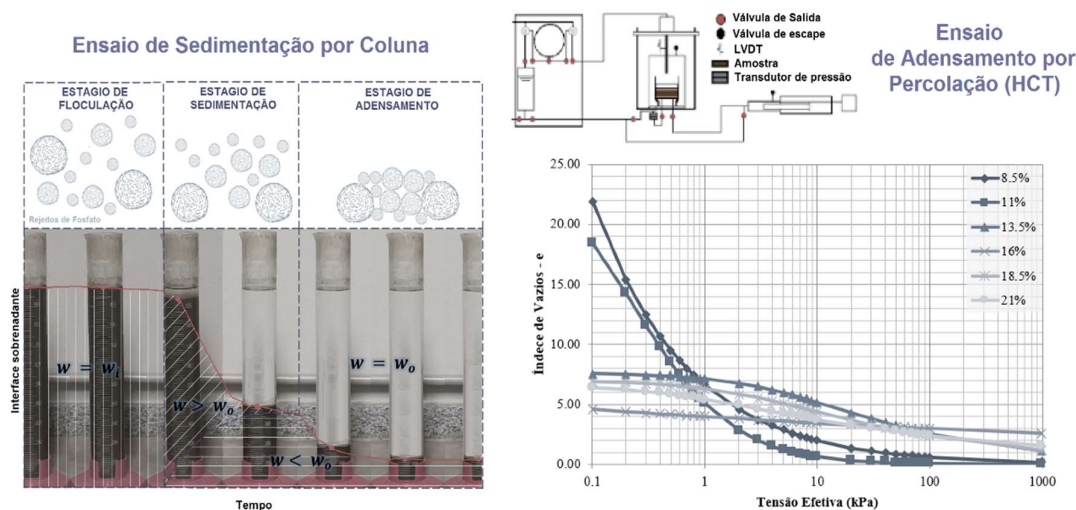


Figura 4.11 – Resultados do segundo e terceiro procedimento da metodologia aplicada

#### 4.4.2 Ensaio de sedimentação em coluna

Os sólidos que constituem o rejeito a serem separados da água salgada que são depositados em tanques de sedimentação foram analisados utilizando a técnica de Sedimentação em Coluna, com uma média de 2,31 g/cm<sup>3</sup> como massa específica dos grãos, e uma salinidade de 4576 ppm como é mostrado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Salinidade do rejeito estudado representado em ppm

Proveta	Salinidade Natural		
	Sw (%)	Volume (cm <sup>3</sup> )	ppm
06	4,58	1000	4576

A maior parte dos sólidos que atingem os tanques de sedimentação são sólidos finos sendo



suscetíveis à floculação. Esse processo ocorreu no laboratório dentro das provetas graduadas para sedimentação. Como as partículas estão sujeitas à floculação, foram medidas as diferenças de altura para um tempo conhecido, obtendo assim a velocidade. Porém, ao fazer ensaios com diferentes tipos de concentração de sólidos e a tendência das partículas a interagir, teve que se estudar quatro classes gerais que poderiam acontecer, uma Sedimentação discreta, Sedimentação por floculação, sedimentação dificultada ou por zona e sedimentação por compressão (Figura 4.12).

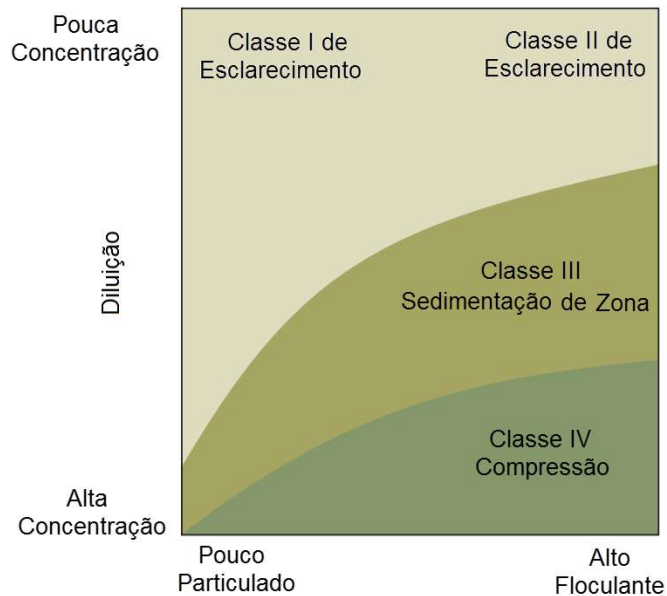


Figura 4.12 - Regimes da Sedimentação (Adaptado de Ekama *et al.*, 1997)

Segundo Torfs (2016), para realizar o ensaio de coluna e obter a curva de sedimentação, é necessário um recipiente cilíndrico que é preenchido com a amostra de lodo e um temporizador é iniciado para acompanhar a duração do ensaio. A amostra em lama é depositada e a posição da interface suspensão-líquido é medida em diferentes intervalos de tempo. Esta metodologia é ilustrada na Figura 4.13, onde a posição da interface suspensão-líquido é indicada pela seta vermelha.

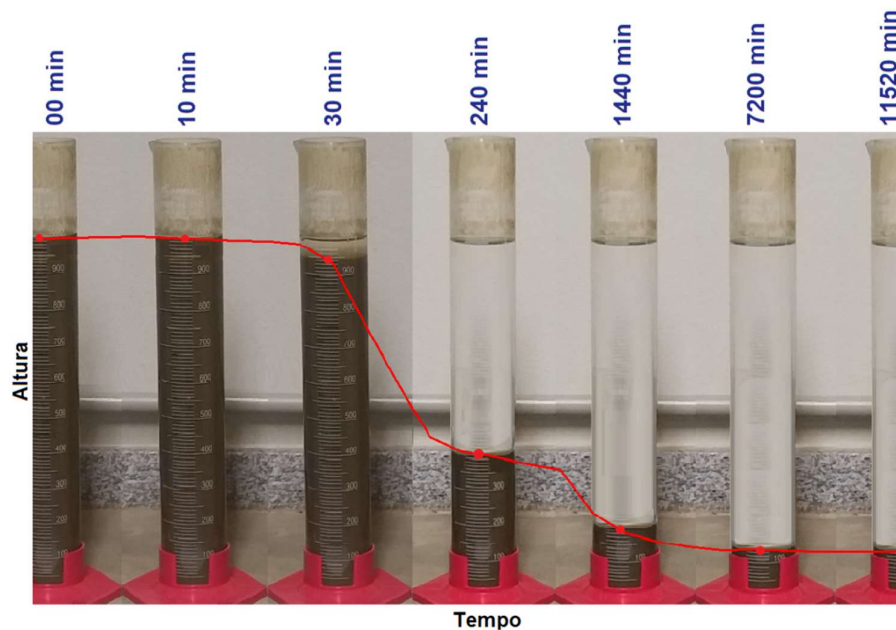


Figura 4.13 - Ensaio de coluna na sedimentação indicando a interface suspensão-líquido

O registro da altura da interface do líquido de suspensão em vários intervalos de tempo resulta em uma curva com a evolução da altura da manta de lodo ao longo do tempo. Os tempos de medição possuem um padrão como disponível que apresenta o ensaio de coluna para um Sw com o floculante com diferentes concentrações, mas eles podem ser adaptados dependendo da dinâmica de decantação de uma amostra específica de lodo. No início do ensaio, a interface suspensão-líquido é tipicamente medida com mais frequência, pois a amostra se deposita em um ritmo relativamente rápido. Posteriormente no ensaio, a frequência das medidas diminui, porque a interface se move mais lentamente.

#### ***A. Rejeito com coagulante***

Segundo Gregory (1981), para que os cálculos se ajustem bem com cálculos “exatos” até separações de cerca de 10% do raio da esfera (Figura 4.14), e a energia de interação pode ser calculada mediante a equação 4.2.

$$V = \frac{A(a_1 * a_2)}{6(a_1 + a_2)d} \quad 4.2$$

Onde:

$a_1$  e  $a_2$  são os rádios das partículas extraídas

$d$  é distância entre as partículas

A é constante de Hamaker

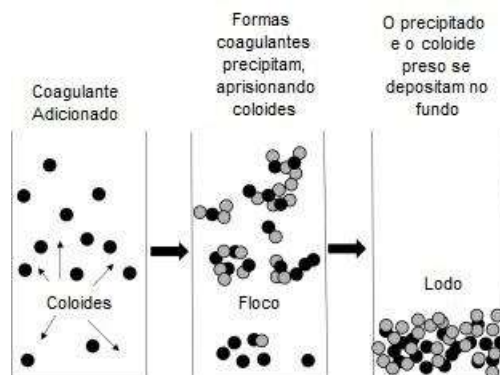


Figura 4.14 - Ilustração do processo de coagulação química (modificado de Martínez-Huitle, 2018)

### *Sulfato de Alumínio*

A função desse coagulante é ligar as cargas negativas conseguindo flocular as partículas do rejeito de fosfato eletronegativas ao neutralizar as cargas ou adsorção-formação de pontes, ou mesmo as duas ao mesmo tempo (Figura 4.15). Com o objetivo de aumentar a densidade para promover a floculação, há uma espécie de “ponte” entre a sua cadeia e as partículas, formando flocos de diâmetros maiores.

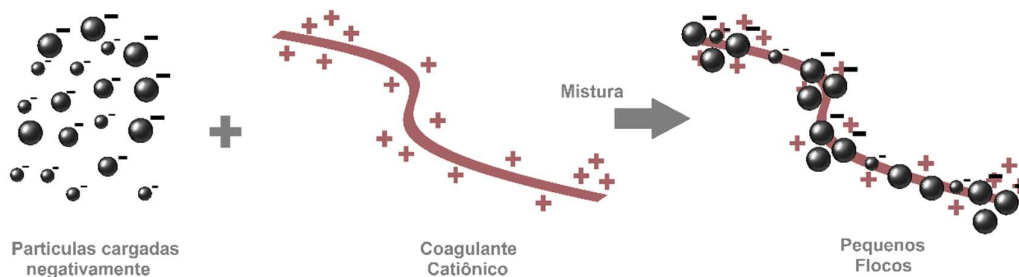


Figura 4.15 - Esquema de interação do rejeito com o floculante

O sulfato de alumínio e o alúmen são sais formados por um cátion trivalente ( $\text{Al}^{+3}$ ) e um anion (o sulfato  $\text{SO}_4^{-2}$ ) e água de cristalização. Diferentes teores de sólidos predeterminados analiticamente foram ensaiados, começando com 8,5% e aumentando quantitativamente em uma relação de 2,5% até atingir o máximo de teor ensaiado, que foi de 21%. Dosagens de coagulantes com valores de 20, 40, 60, 80, 100 e 120 ppm foram colocadas para cada uma das provetas, teve-se também uma proveta com rejeito sem coagulante. A Figura 4.16 mostra o processo de sedimentação ao longo dos tempos mensurados.



Figura 4.16 - Processo de sedimentação para um teor de sólidos de 21% utilizando coagulante sulfato de alumínio

As tabelas do APÊNDICE A mostram as propriedades para cada teor de sólidos em relação das sete provetas utilizadas. Observa-se uma diminuição nos valores do pH como consequência da interação da superfície da partícula (os íons de hidrogênio:  $H^+$  e íons hidroxila:  $OH^-$ ), as cargas se diferenciam de acordo com o coagulante. O pH é inversamente proporcional à condutividade elétrica, pois ela aumenta com a diminuição do potencial hidrogeniônico. A temperatura durante os ensaios também foi medida com um termômetro digital, demonstrando ser constante para cada teor ensaiado.

Os resultados dos ensaios realizados para os teores de 8,5% a 21% foram realizados com um tempo padrão, com uma duração de 18720 minutos (13 dias). Os intervalos foram correlacionados de acordo com os três estágios do processo de sedimentação (estágio de coagulação, estágio de sedimentação e estágio de adensamento). Além disso, as tabelas consideram as diferentes dosagens colocadas para cada proveta. As dosagens selecionadas, por serem as mais utilizadas na indústria, iniciaram-se com as provetas em estado natural, sem floculante, e progressivamente aumentou-se em 20 ppm até 120 ppm. A colocação do coagulante, previamente diluído em água, com o mesmo teor de salinidade do rejeito, foi colocado na proveta, para ser agitado e misturado com a polpa, favorecendo a formação dos flocos.

A APÊNDICE B mostra as curvas típicas do ensaio de sedimentação do rejeito de fosfato para cada teor de sólido e dosagem de coagulante. Os teores de sólidos aumentam a cada 2,5%, pode-se distinguir que a curva vai se suavizando, porém, a diferenciação dos três estágios da sedimentação é mantida notoriamente acontecendo dentro dos 10 primeiros

minutos: a etapa de floculação acontece para dar continuidade a de sedimentação propriamente e, finalmente, quando não tem mais flocos para sedimentar poderia começar a de adensamento, que no caso do rejeito e de acordo com Figura 3.01 da sequência de deposição das partículas segundo Imai (1981) começa com a sedimentação.

### *Sulfato de Ferro*

O sulfato de ferro II, ou conhecido como sulfato ferroso, é um sal neutro, formado por um cátion ao adquirir mais de uma valência, nesse caso a menor, sendo então produto da neutralização total do anion do sulfato  $\text{SO}_4^{2-}$ . Junto com a alúmen, sulfato de alumínio, o sulfato de ferro é um dos coagulantes mais utilizados no tratamento de águas industriais, isto por seu desempenho físico-químico com resultados significativos. As tabelas do APÊNDICE C mostram detalhadamente as propriedades correspondentes aos teores de sólidos de 8,5%, 11% e 13,5%, um pH alcalino e a condutividade elétrica. Nesse caso, o coagulante utilizado não mostrou a eficácia necessária para continuar com os outros 3 teores. O efeito da ação coagulante na polpa do rejeito de fosfato foi muito baixo, ou seja, a qualidade de produção de pontes entre as partículas não foi suficiente para que a velocidade de sedimentação fosse considerada aceitável.

Os resultados dos ensaios realizados para os teores de 8,5%, 11% e 13,5%, com tempo padrão para a execução do ensaio, de acordo com os estágios do processo de sedimentação, os intervalos variaram de 02 a 1440 minutos para finalizar o ensaio em 18720 minutos, sendo 13 dias. Além disso, as tabelas consideram as diferentes dosagens colocadas para cada proveta, dosagens selecionadas por serem as mais operadas na indústria, iniciando com a proveta em estado natural, sem coagulante e, progressivamente, o aumento em 20 ppm, empregando dosagens de 20 ppm, 40 ppm, 60 ppm, 80 ppm, 100 ppm e 120 ppm. Para o procedimento de colocação do coagulante, este foi previamente diluído em água própria do rejeito e precipitado na proveta, para ser agitado e homogeneizado na polpa toda. O APÊNDICE D mostra as curvas típicas do ensaio de sedimentação do rejeito de fosfato para cada teor de sólido e dosagem de coagulante, ressaltando, por exemplo, que para o teor de sólidos de 13,5% o coagulante não demonstrou ser muito interessante para seu emprego no caso de rejeitos de fosfato (Figura 4.17), isto por não formar as pontes de atração eletrostática necessárias, como

consequência, a velocidade de sedimentação não mostraria um incremento significativo para teores de sólidos com valores mais altos.

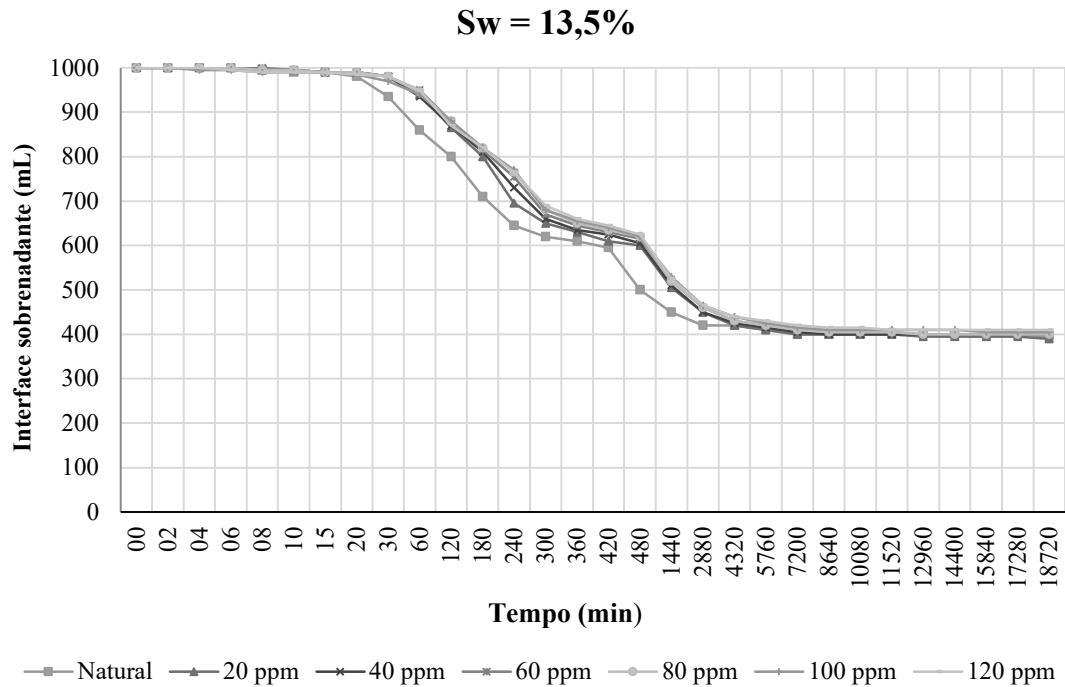


Figura 4.17 - Curvas de sedimentação para um Sw de 13,5% com sulfato de ferro como coagulante com diferentes concentrações

### B. Rejeito com floculante orgânico

Para Ji (2013), um modelo simplificado para a interseção do floculante-partícula (Figura 4.18) deve considerar a energia de interação entre duas partículas esféricas na presença do químico. O autor também faz menção à importância dessa interação para a estabilização do sistema coloidal, geralmente calculada como uma soma das atrações intermoleculares de Van der Waals.

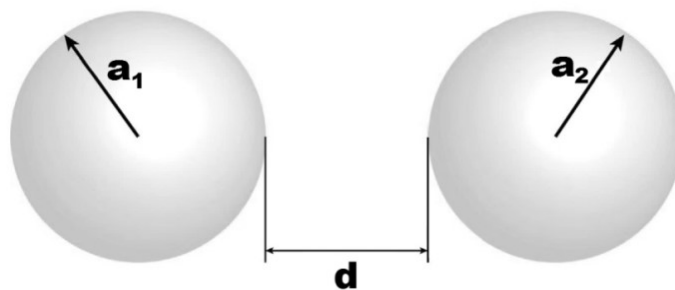


Figura 4.18 - Esquema de interação entre duas partículas sólidas na presença de floculante (Ji, 2013)

Conforme Kemira (2015), é um floculante de polímero orgânico do tipo catiônico, com uma carga relativa muito alta e um peso molecular alto, pela sua estrutura química do polímero permite atender os requisitos do processo exigente de recuperação e reutilização de água, tem várias vantagens frente aos seus concorrentes inorgânicos, como, por exemplo, menor dosagem e um relativo menor custo, possui um alto peso molecular e uma ampla faixa de aplicação. No entanto, diferentes métodos de síntese e diferentes monômeros envolvidos na polimerização obteriam produtos polimerizados com diferentes desempenhos de floculação, a Tabela 4.5 apresenta as principais características do floculante.

Tabela 4.5 – Propriedades típicas do floculante selecionado

Floculante	Caráter químico	Aparência	Carga relativa	Peso molecular	Densidade (kg/l)	pH solução ao 0.5% (25°C)	viscosidade a 25°C ao 1% (cp/mPa.s)
C-498	Poliacrilamida catiônico	Pó granular branco	Muito alta	Alto	0,75	3,5 – 5,0	2000

Existem no mercado várias maneiras para conseguir iniciar os floculantes poliméricos catiônicos sendo as mais populares a polimerização induzida por calor, por plasma, por radiação e por micro-ondas (Kumar *et al.*, 2015), sendo uma nova opção sintetizada sob irradiação UV usando acrilamida (Chen *et al.*, 2018). Alguns desses floculantes são porosos e soltos com alto peso molecular e uma grande área de superfície específica, o que pode aumentar a probabilidade de colisão de partículas coloidais e floculantes, além de melhorar a capacidade das unidades catiônicas de neutralizar negativamente as partículas carregadas em partículas coloidais de lodo (Liu *et al.*, 2014).

As mesmas técnicas e condições utilizadas para os coagulantes, sulfato de alumínio e sulfato de ferro (II), foram empregadas para realização dos ensaios de coluna com a aplicação do C-498, com dosagem de 20 ppm, 40 ppm, 60 ppm, 80 ppm, 100 ppm e 120 ppm para identificar o desempenho com o rejeito de fosfato. As tabelas do APÊNDICE E apresentam os resultados obtidos das medições do teor de sólidos, teor de água, pH, condutividade elétrica. Em todos eles a salinidade foi constante, com um valor de 4576 ppm, mostrando sempre uma combinação eficiente entre o teor de salinidade e as dosagens aplicadas nos ensaios, evidenciando um desempenho superior do que seus similares.

Os resultados dos ensaios realizados com C-498 para os teores de 8,5%, 11%, 13,5%, 16%, 18,5% e 21%, foram realizados com intervalos padronizados, de acordo com os estágios do processo de sedimentação os tempos variaram de 02 até 1440 minutos para finalizar o ensaio em 18720 minutos. Aliás, se considerar as diferentes dosagens colocadas para cada proveta, dosagens selecionadas por serem as mais operadas na indústria, iniciando com a proveta em estado natural, sem floculante e progressivamente o aumento em 20 ppm, empregando dosagens de 20 ppm, 40 ppm, 60 ppm, 80 ppm, 100 ppm e 120 ppm para a realização de sete ensaios por cada teor de sólidos fazendo um total de 42 ensaios de coluna.

Para o procedimento de colocar o floculante, ele foi rapidamente diluído em água própria do rejeito e precipitado na proveta, para ser precipitado e homogeneizado naturalmente na polpa toda de acordo com as indicações técnicas do fabricante. As curvas típicas do ensaio de sedimentação do rejeito de fosfato para cada teor de sólido e dosagem de floculante são apresentadas no APÊNDICE F. Essas curvas evidenciam claramente o excelente desempenho que tem essa substância frente a seus competidores, um rápido tempo para a floculação ressalta-se no estágio desse processo, uma rápida formação de pontes por atração eletrostática também é notória na etapa de sedimentação, no qual a curva em estado natural fica distante das curvas que utilizaram as dosagens (Figura 4.19).

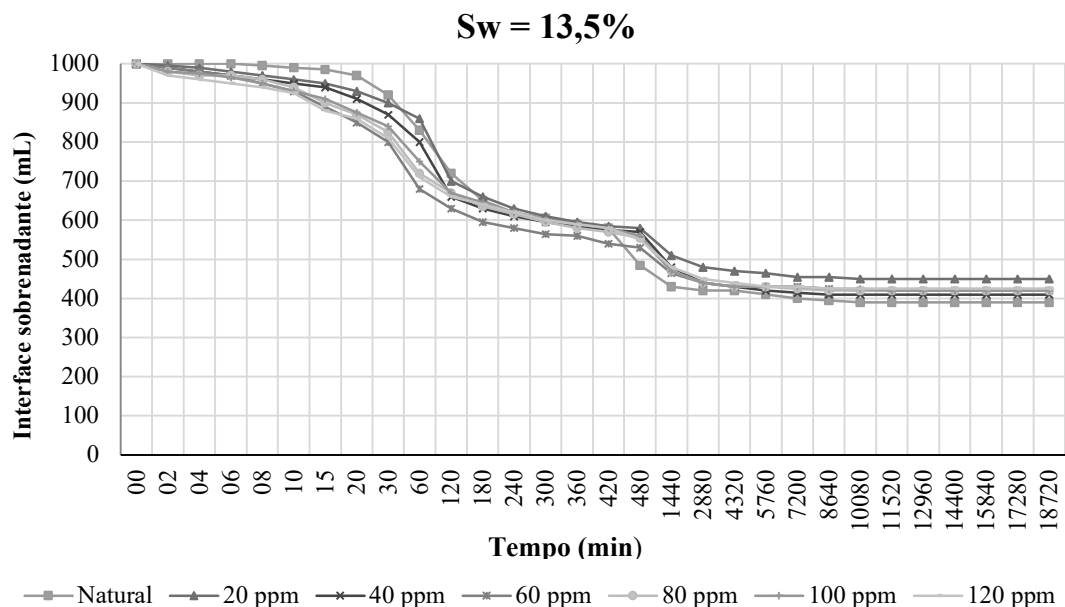


Figura 4.19 - Curvas de sedimentação para um Sw de 13,5% com C-498 como floculante orgânico com diferentes concentrações



Para descrever o último estágio referente ao adensamento para o processo de sedimentação é necessário explicar que foram observados detalhadamente durante os 13 dias, que durou cada um dos 42 ensaios de coluna, e constatou-se que ao acontecer mais rápido os dois primeiros estágios, o último é afetado na interfase sobredrenante, ficando um volume mais alto do que aqueles que apresentaram alguns estágios de floculação e sedimentação mais lentos. Entende-se que isso acontece por causa de uma desordenada e violenta acomodação dos flocos originados de forma apressada e que ao descer todos juntos velozmente e ao tentar se consolidar criam maiores vazios do que quando descem moderadamente. Uma média de 38 mL de diferença entre a proveta com condições naturais e a última proveta com uma dosagem de 120 ppm de floculante mostra um volume relevante quando analisamos a seleção do floculante.

### ***C. Rejeito alterado mediante secagem em estufa***

Com um fim acadêmico, outro ensaio de sedimentação foi realizado com rejeito de fosfato secado em estufa e posteriormente hidratado, para conhecer o seu comportamento nessas situações. Segundo Dia *et al.* (2019), a utilização de uma estufa para a secagem do material é uma técnica utilizada que permite a maturação dos cristais do material, já que os fosfatos bem cristalizados têm uma estrutura mais estável. Ramaroson *et al.* (2009, 2012) trabalhou com o tratamento de sedimentos com fosfatos solúveis seguidos por calcinação, para produzir materiais utilizáveis com propriedades físicas interessantes e destruir material orgânico, conseguindo também a otimização dos processos de disposição de rejeitos de fosfato.

Depois de haver simulado as condições ambientais em laboratório que poderiam acontecer com o rejeito no campo (secado e hidratado), a metodologia do ensaio de coluna foi replicada. Para saber o comportamento desse rejeito secado e hidratado foi colocado também sulfato de alumínio, e foram empregadas para realização dos ensaios de coluna dosagem de 20 ppm, 40 ppm, 60 ppm, 80 ppm, 100 ppm e 120 ppm para teores de sólidos de 8,5%, 11%, 13,5%, 16%, 18,5% e 21%, para serem avaliados novamente e analisar o desempenho ao ser misturado com o rejeito de fosfato.

As tabelas do APÊNDICE G mostram os valores obtidos dos ensaios do teor de sólidos e teor de água, obtidos de acordo a norma NBR 6457 (ABNT, 2016); também foi utilizado

um pHmetro multiplex do Laboratório de Saneamento Ambiental da UFOP para fazer as medições do pH e condutividade elétrica. Em todos eles mantendo a salinidade constante de 4576 ppm, mostrando sempre uma combinação eficiente entre o teor de salinidade e as dosagens aplicadas nos ensaios, evidenciando um desempenho superior do que seus similares.

Os valores obtidos dos 42 ensaios de coluna realizados para os teores de 8,5% a 21%, de acordo com os padrões de intervalos estabelecidos começaram em 02 até 1440 minutos para finalizá-los em 18720 minutos, configurando um total de 13 dias por ensaio de coluna, além disso, mostram as dosagens que foram selecionadas de acordo com o emprego da indústria de tratamento de resíduos, a primeira proveta sempre foi ensaiada de maneira natural e as seguintes seis provetas já com dosagens que foram proporcionais em forma aumentativa em 20 ppm, empregando então dosagens de 20 ppm, 40 ppm, 60 ppm, 80 ppm, 10 ppm e 120 ppm.

Desses resultados obteve-se um melhor desempenho nos estágios de sedimentação no qual a interfase sobrenadante é muito menor do que o estado natural sem aplicação do floculante. No estágio de adensamento, as diferenças entre as interfases sobrenadantes foram mais leves do que em outros ensaios que não foram secos em estufa, com uma média de 15 mL dos valores em teores como 11% de 225 mL (natural) até 240 mL (120 ppm), 13,5% de 295 mL (natural) até 310 mL (120 ppm), 16% de 365 mL (natural) até 375 mL (120 ppm), 11% de 435 mL (natural) até 450 mL (120 ppm), 11% de 510 mL (natural) até 530 mL (120 ppm). Também é relevante descrever que no teor 8,5% mostrou-se sempre a mesma interfase sobrenadante de 140 mL, aliás, houve menores valores para dosagens de 40 ppm e 60 ppm atingindo um valor de 135 mL. Resultados similares foram percebidos no teor de 16% com dosagem de 60 ppm com um valor 360 mL.

As figuras do APÊNDICE H apresentam o formato da curva de sedimentação do rejeito de fosfato convencional, mostrando notoriamente os três estágios da sedimentação. Essa curva típica para cada teor de sólido e dosagem de coagulante evidencia claramente que a recristalização do rejeito favorece a sedimentação. As partículas têm decantado mais rápido, aliás, no estágio de adensamento a melhor deposição dessas partículas tem sido similar, ou melhor, do que o estado natural.

Também é relevante indicar que a curva do teor de sólidos de 8,5%, tem o formato da curva típica, mas tem descido violentamente e mostrado um achatamento na última parte do estágio de sedimentação, isso relacionado à quantidade de partículas que descem rapidamente, nos outros teores a tendência é aumentar e vai se suavizando ao mesmo tempo até atingir 21% de teor de sólidos.

### ***Cálculo da Velocidade de Sedimentação***

De acordo com Kynch (1952), o seu modelo cinemático da sedimentação mostrou que um processo de sedimentação de partículas dispersas em um fluido é de grande importância prática, mas sempre se mostrou extremamente difícil examiná-lo teoricamente; o problema hidrodinâmico de uma partícula caindo através de um fluido resolvido pela Lei de Stokes, porém, é muito complexa para seu uso industrial. O autor deu muito valor à concentração de sólidos, apresentando um avanço significativo no entendimento do processo de sedimentação, o que mereceu a atenção da indústria pela simplicidade da aplicação em projetos de equipamentos sedimentadores, reduzindo consideravelmente os ensaios experimentais necessários. Porém, o autor assumiu quatro regiões para o processo de sedimentação como região de líquido clarificado, região de sedimentação livre, região de transição e rejeito de formação do sedimento como mostrado na Figura 4.20, o rejeito de fosfato apresenta três regiões, porque não foi observada nenhuma etapa de transição durante o ensaio.

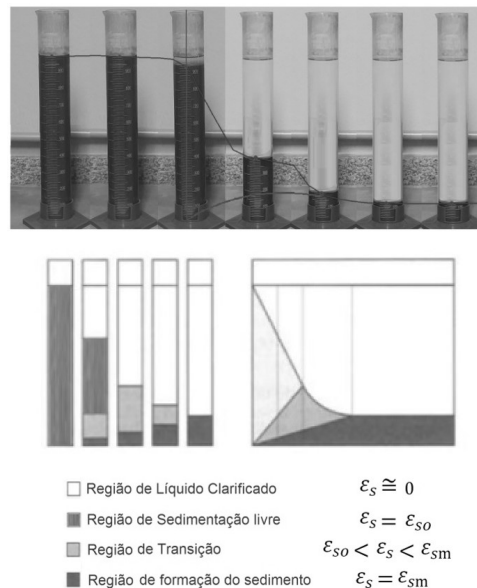


Figura 4.20 - O processo de sedimentação em coluna segundo a teoria de Kynch

Apesar do trabalho do autor tratar apenas de sedimentação em batelada, pode-se utilizar seus conceitos em sedimentadores contínuos, pois foi apresentada uma forma de calcular a concentração da interface superior em função do tempo de ensaio; em um ensaio de teste de coluna os resultados são plasmados e apresentados na Figura 4.21. A Equação 4.3 mostra uma forma simplificada de calcular a concentração da interface superior em função do tempo de ensaio que geralmente é utilizada também em sedimentadores contínuos representados nos ensaios de coluna.

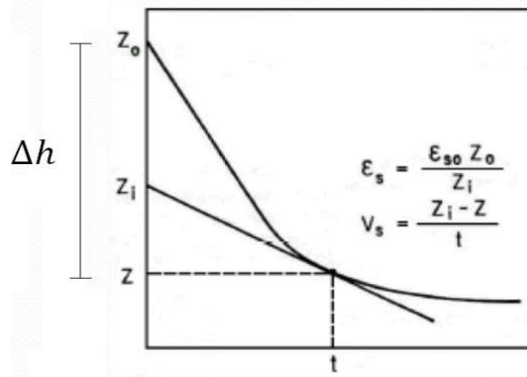


Figura 4.21 - Interpretação gráfica dos resultados de Kynch

$$\varepsilon_s = \frac{\varepsilon_{s0} z_0}{z_i} \quad 4.3$$

Sendo  $z_0$  a altura inicial da suspensão em um teste de proveta e  $z_i$  é a intersecção da tangente a curva de sedimentação, no tempo em questão, com a reta tangente. A velocidade de sedimentação dos sólidos na interface superior pode ser calculada a partir da Equação 4.4 e resumida na Equação 4.5.

$$v_s = -\frac{dz}{dt} = \frac{z_i - z}{t} \quad 4.4$$

$$v_s = \frac{\Delta h}{t} \quad 4.5$$

Dessa lógica, questiona-se então a influência de vários fatores que poderiam contribuir para uma ótima deposição dos sedimentos finos, como o rejeito em estudo, porém, existem fatores que atingem diretamente as características desse processo, como o uso de agentes que aceleram a sedimentação. Esses agentes coagulantes e floculantes foram estudados detalhadamente para observar o comportamento do rejeito no desenvolvimento dos mecanismos envolvidos nos estágios de sedimentação. Nessa análise, a floculação com principais coagulantes e floculantes foi comparada para avaliar a colisão e a coesão

das partículas em diferentes teores de sólidos ao aumentar seu tamanho pela floculação e, baseado nesse fundamento, a velocidade de sedimentação tende-se a se incrementar, essa velocidade foi quantificada e justificada neste item.

Outro fator para ser considerado deve ser a lei que vai agir na velocidade. Nesse caso, ao trabalhar com rejeitos, o movimento browniano foi considerado por promover a colisão entre as partículas e a consequente agregação de um jeito mais específico ao gerar um incremento do tamanho da partícula, conseqüentemente, o diâmetro dos agregados formados, agregação de partículas por colisões, permitindo, portanto, o fenômeno de floculação, considerado fundamental para a análise dos rejeitos respectivos ao processo de separação da mistura das partículas suspensas na água. O movimento browniano considera também que as partículas seguem uma trajetória incerta, diferente do estipulado na Lei de Stokes que afirma que as partículas seguem um fluxo laminar baseado no coeficiente de Reynolds; e vai de acordo com o rejeito de fosfato.

#### **4.4.3 Ensaios de *Jar Test***

Os ensaios de *Jar Test* foram realizados no Laboratório de Saneamento Ambiental da UFOP para contrastar os resultados obtidos nos ensaios de coluna. Foram utilizadas dosagens de coagulante de 60 ppm e de floculante de 80 ppm para um teor de sólidos de 16%, determinados como ótimos durante os ensaios anteriores de sedimentação. Os tempos de agitação e sedimentação para o coagulante e o floculante foram respectivamente selecionados de acordo com os padrões trabalhados no laboratório. Foram adicionados 2 litros da amostra de rejeito de fosfato, devidamente homogeneizadas, para cada jarro e, em seguida, o material foi agitado. Em um dos recipientes, foi pipetada uma dosagem pré-determinada de coagulante e, em outro, de floculante. Essa dosagem foi baseada nos resultados obtidos pelos ensaios de coluna e as amostras foram agitadas em rotação, denominada etapa lenta. De acordo com Satterfield (2005), a rotação dos agitadores necessita de um gradiente de velocidade correspondente às etapas de mistura rápida e mistura lenta. Para o tempo de agitação adotado foi criado um programa de início rápido até se atingir as 410 RPM durante 10 segundos. No último segundo foi pipetado o aditivo e depois a agitação foi diminuindo até atingir um valor de 50 RPM em 60 segundos. Após 10 minutos de sedimentação com a formação dos flocos (por coagulação e por floculação) foi coletada a primeira amostra para medir a Unidade

Nefelométrica de Turbidez (NTU). Mais duas amostras foram coletadas, uma após 20 minutos e a última aos 30 minutos. Os valores obtidos ao longo do ensaio são apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Propriedades de Turbidez para diferentes tempos

Tempo (min)	Turbidez (NTU)	
	Coagulante	Floculante
10	305	0.10
20	3.05	2.11
30	3.16	1.84

A tabela anterior apresenta os resultados obtidos de níveis de NTU correspondentes a uma concentração do produto usado com o padrão chamado Formazin, um polímero heterocíclico. Os resultados do coagulante apresentam valores mais altos do que o floculante, isto porque a maior velocidade de sedimentação e rápida diminuição das partículas do rejeito em suspensão está dada pelo floculante.

#### 4.4.4 Ensaio de adensamento induzido por percolação (HCT)

As amostras utilizadas para o ensaio de HCT também foram empregadas com os seguintes teores de sólidos de 8,5%, 11%, 13,5%, 16%, 18,5% e 21%. Além disso, foram utilizadas duas velocidades de fluxo predeterminadas em estudos anteriores como Cançado (2010) e Pereira (2017), uma primeira para fluxo contínuo (0,35 mL/min) e uma segunda, equivalente à décima parte da primeira, referente à fase de permeabilidade com carregamento (0,035 mL/min). Os ensaios HCT foram divididos em quatro etapas:

- Na primeira etapa foram utilizados nos ensaios o rejeito de fosfato em seu estado natural (com salinidade oriunda do beneficiamento e sem aplicação de aditivo).
- Na segunda etapa considerou-se a utilização de coagulante nas amostras com salinidade oriunda do beneficiamento.
- Na terceira etapa considerou-se a utilização do floculante nas amostras com salinidade oriunda do beneficiamento.
- Na quarta etapa considerou-se ensaios com amostras dessalinizadas com teor de sólidos e dosagem de coagulante e o floculante com melhor desempenho.

O ensaio de adensamento induzido por percolação trabalha com a aplicação de carregamentos estáticos, que permitem obter os valores de índices de vazios referentes

aos níveis de tensões superiores. Após a colocação dos pesos e ser atingido o nível de tensão de 30 kPa, o corpo de prova permanece sob o mesmo carregamento até tornar-se estável, considerando a variação de altura, que foi controlada pelo software do aparelho. Os dados foram selecionados e feito seu correspondente registro, a fim de se obter as curvas de adensamento por carregamento estático para todos os teores de sólidos.

As poropressões na base da amostra são as responsáveis pelo adensamento devido ao carregamento, chegando próxima à tensão acumulada, valores avaliados nos registros do ensaio. A estabilização do ensaio acontece quando se consegue atingir a imperturbabilidade dos valores das poropressões durante o percurso do ensaio. O padrão para o adensamento induzido por percolação teve uma duração de aproximadamente 8,5 horas, o que proporcionou um registro com valores abrangentes e muito consistentes com valores estabilizados no encerramento do ensaio.

A etapa referente ao carregamento estático teve uma duração de aproximadamente o dobro da sua antecessora, para isso é recomendado aproveitar o horário noturno e no dia seguinte continuar com a última etapa. À medida que aumentam os teores de sólido, as deformações e as poropressões também aumentam proporcionalmente. A última etapa de permeabilidade tem uma duração aproximada de 4,17 horas considerando sempre o registro dos valores das poropressões.

Finalmente, para conhecer os antecedentes dos principais resultados do ensaio HCT é utilizado o SICTA (do inglês *Seepage Indiced Consolidation Test Analysis*) um algoritmo que abrange o efeito de minimizar a soma dos quadrados das diferenças normalizadas entre os dados práticos de laboratório e as previsões calculadas para esses dados (Abu-Hejleh e Znidarcic, 1992).

O SICTA é um software sugerido para determinar as relações constitutivas para realizar as curvas de índice de vazios versus tensão efetiva e índice de vazios versus permeabilidade, mediante a aquisição dos parâmetros empíricos constitutivos associados ao material obtidos por meio dos ensaios de adensamento induzidos por percolação A, B, Z, C e D, dos quais os modelos matemáticos são expressos pela Equação 4.6 (Liu e Znidarcic, 1991) e a Equação 4.7 (Somogyi, 1979), equações aprofundadas pelos autores Abu-Hejleh (1993, 1995), Yao e Znidarcic (1997) e Yao *et al*, (2002).

$$e = A * (\sigma' + Z)^B$$

4.6

$$k = Ce^D$$

4.7

Testado o aparelho HCT e avaliados os valores obtidos ao serem comparados com padrões de materiais estudados, que deram a aprovação da boa reprodução dos resultados, a conformidade para executar a programação experimental e cumprir com os objetivos de se trabalhar com cada um dos teores padronizados foi realizada exitosamente, visto que durante a parte experimental o rejeito de fosfato mostrou-se como um material dominado por partículas finas. Para melhorar a bibliografia do modo de se comportar do rejeito, estudos desse material foram realizados para seis teores de sólidos diferentes acrescentados em 2,5% ao seu antecessor para abranger uma escala mais ampla, extraídas de forma correta do recipiente de armazenamento nos quais foram tratados para sua homogeneização. Os valores das amostras para cada teor são apresentados na Tabela 4.6, considerando dados iniciais de uma altura de 7.00 cm, uma área de 62.21 cm² e um volume de 435.48 cm³.

Tabela 4.6 – Dados iniciais dos corpos de prova mensurados

Dados da amostra	Teores de sólidos sem aditivos (%)						Teores de sólidos com coagulante (%)						Teores de sólidos com flocculante (%)					
	8.5	11	13.5	16	18.5	21	8.5	11	13.5	16	18.5	21	8.5	11	13.5	16	18.5	21
Teor de umidade inicial (%):	1074.07	807.73	639.71	525.98	440.99	377.01	1073.61	807.20	640.26	526.16	441.23	377.44	1077.27	807.41	643.70	527.03	441.23	377.44
Teor de sólidos inicial (%):	8.52	11.02	13.52	15.97	18.48	20.96	8.52	11.02	13.51	15.97	18.48	20.94	8.49	11.02	13.45	15.95	18.48	20.94
Massa inicial (g):	454.98	462.83	471.24	477.19	483.14	492.29	465.12	471.50	477.62	494.43	499.94	505.04	469.66	475.50	470.55	489.92	507.86	540.31
Massa seca (g):	81.10	104.49	130.89	155.02	181.03	204.52	39.63	51.97	64.52	78.96	92.37	105.78	39.89	52.40	63.27	78.13	93.83	113.17
Massa esp. dos grãos (g/cm³)	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31
Massa específica inicial (g/cm³):	1.04	1.06	1.08	1.10	1.11	1.13	1.07	1.08	1.10	1.14	1.15	1.16	1.07	1.08	1.10	1.14	1.15	1.16
Massa esp. seca inicial (g/cm³):	0.09	0.12	0.15	0.18	0.21	0.24	0.09	0.12	0.15	0.18	0.21	0.24	0.09	0.12	0.15	0.18	0.22	0.26
Índice de vazios inicial:	24.67	18.25	14.40	11.83	10.00	8.63	24.38	18.36	14.59	11.74	9.89	8.51	24.22	18.20	14.90	11.88	9.72	7.89

O algoritmo aplicado para poder computar neste estudo precisou de informações que tiveram que ser previamente calculadas, desde as referências básicas como valores geométricos iniciais da amostra, propriedades do rejeito como a umidade inicial, massa de sólidos específica, altura de sólidos e valores que foram obtidos a partir da Equação 4.8.

$$H_s = \frac{M_s}{(\rho_s * A)}$$

4.8

Onde:

$H_s$ : altura de sólidos (cm)

$M_s$ : massa dos sólidos da massa seca (g)

$\rho_s$ : massa específica dos sólidos (g/cm³)

$A$ : área do corpo de prova (cm²)

As relações básicas da Mecânica dos Solos auxiliaram para obter o valor do índice de vazios inicial, este valor possibilitou consequentemente conhecer os valores da altura inicial do corpo de prova aplicando a Equação 4.9, antes da sedimentação e adensamento por peso próprio dos valores das massas específicas saturada e seca, além do volume.

$$H_i = (1 + e_i)$$

4.9



Onde:

$H_i$ : altura inicial da amostra antes da sedimentação e adensamento por peso próprio (cm)

$e_i$ : índice de vazios inicial do corpo de prova

Depois da montagem dos corpos de prova no aparelho, os valores iniciais foram obtidos para cada um dos teores de sólidos que são apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Dados iniciais dos corpos de prova – calculados

Dados da amostra	Teores de sólidos sem aditivos (%)						Teores de sólidos com coagulante (%)						Teores de sólidos com floculante (%)					
	8.5	11	13.5	16	18.5	21	8.5	11	13.5	16	18.5	21	8.5	11	13.5	16	18.5	21
Altura de sólidos - $H_s$ (cm):	0.27	0.35	0.44	0.53	0.62	0.72	0.28	0.36	0.45	0.55	0.64	0.74	0.28	0.36	0.44	0.54	0.65	0.79
Índice de vazios inicial - $e_i$ :	24.81	18.66	14.78	12.15	10.19	8.71	24.80	18.65	14.79	12.15	10.19	8.72	24.89	18.65	14.87	12.17	10.19	8.72
Altura inicial - $H_i$ (cm)	6.97	6.88	6.94	6.97	6.94	6.99	7.12	7.11	7.09	7.23	7.19	7.15	7.19	7.17	6.99	7.16	7.31	7.65
Volume inicial - $V_i$ (cm³):	433.53	428.08	431.95	433.58	431.61	434.93	442.64	442.02	441.03	449.65	447.55	445.05	447.03	445.78	434.67	445.61	454.64	476.13
Massa esp. inicial (g/cm³):	1.05	1.08	1.09	1.10	1.12	1.13	1.05	1.07	1.08	1.10	1.12	1.13	1.05	1.07	1.08	1.10	1.12	1.13
Massa esp. seca inicial (g/cm³):	0.19	0.24	0.30	0.36	0.42	0.47	0.09	0.12	0.15	0.18	0.21	0.24	0.09	0.12	0.15	0.18	0.21	0.24

Fazendo uso do mesmo argumento, continuando com os cálculos dos valores necessários para o algoritmo depois de sedimentar e adensar o corpo de prova pelo próprio peso, teve-se que obter os primeiros valores de entrada para o SICTA que foram o índice de vazios para tensão efetiva nula e a altura inicial da amostra, mediante a aplicação da Equação 4.10.

$$H_0 = H_s(1 + e_{00})$$

4.10

Onde:

$H_0$ : altura inicial do corpo de prova (cm).

$e_{00}$ : índice de vazios associado à tensão efetiva nula.

Conforme Cançado (2010), para melhorar a técnica para obter o valor do teor de umidade considerou o uso de uma câmera secundária, que fica fora do aparelho, permitindo a praticidade para poder realizar esse ensaio com o uso da amostra que fica sedimentado nele, aplicando a NBR 6457 (ABNT, 2016), valor necessário para conseguir o índice de vazios. Os valores equivalentes à tensão efetiva nula são mostrados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Dados dos corpos de prova após sedimentação e adensamento por peso próprio –  $\sigma_0$  - calculados

Dados da amostra	Teores de sólidos sem aditivos (%)						Teores de sólidos com coagulante (%)						Teores de sólidos com floculante (%)					
	8.5	11	13.5	16	18.5	21	8.5	11	13.5	16	18.5	21	8.5	11	13.5	16	18.5	21
Teor de umidade (%):	395.65	389.15	328.62	320.48	301.58	285.84	475.29	405.66	352.82	336.09	306.88	273.27	461.05	408.20	353.09	322.43	277.35	233.88
Índice de vazios - $e_{00}$ :	9.14	8.99	7.59	7.40	6.97	6.60	10.98	9.37	8.15	7.76	7.09	6.31	10.65	9.43	8.16	7.45	6.41	5.40
Altura - $H_0$ (cm):	2.74	3.50	3.78	4.45	4.94	5.47	3.30	3.75	4.11	4.82	5.20	5.38	3.23	3.80	4.03	4.59	4.84	5.04
Volume - $V_0$ (cm³):	170.46	217.74	235.16	276.84	307.32	340.30	205.52	233.33	255.57	299.56	323.45	334.86	201.20	236.59	250.80	285.75	300.87	313.66
Massa específica seca (g/cm³):	0.48	0.48	0.56	0.56	0.59	0.60	0.19	0.22	0.25	0.26	0.29	0.32	0.20	0.22	0.25	0.27	0.31	0.36

Junto com os valores de variação de altura da amostra nesta etapa e na variação de altura de sólidos foram utilizadas as Equações 5.11 e 5.12 para obter os índices de vazios finais das etapas de adensamento induzido por percolação e carregamento. Estes valores finais auxiliaram para os cálculos dos resultados do adensamento induzido por percolação, carregamento e permeabilidade por percolação que são mostrados na Tabela 4.9 e apresenta uma vazão de adensamento de 0.35 ml/min e uma velocidade de Darcy de  $9.38 \times 10^{-7}$ . Os dados do ensaio de carregamento em etapas são mostrados na Tabela 4.10 com uma Tensão 48.10 kPa. Já a Tabela 4.11 mostra os dados do ensaio de permeabilidade por percolação para todos os teores de sólidos estudados.

$$e_{fa} = e_{00} - \frac{\Delta H_a}{H_s}$$

4.11

$$e_{fc} = e_{fa} - \frac{\Delta H_c}{H_s}$$

4.12

Onde:

*efa*: índice de vazios final na etapa de adensamento por percolação (cm)

*efc*: índice de vazios final na etapa de carregamento

*ΔHa*: variação de altura da amostra na etapa de adensamento por percolação (cm)

*ΔHc*: variação de altura da amostra na etapa de carregamento

Tabela 4.9 – Dados do ensaio de adensamento induzido por percolação

Dados da amostra	Teores de sólidos sem aditivos (%)						Teores de sólidos com coagulante (%)						Teores de sólidos com floculante (%)					
	8.5	11	13.5	16	18.5	21	8.5	11	13.5	16	18.5	21	8.5	11	13.5	16	18.5	21
Velocidade - v (m/s)	9.38x10 <sup>-7</sup>	9.38x10 <sup>-7</sup>	9.38x10 <sup>-7</sup>	9.38x10 <sup>-7</sup>	9.38x10 <sup>-7</sup>	9.38x10 <sup>-7</sup>	9.38x10 <sup>-7</sup>	9.38x10 <sup>-7</sup>	9.38x10 <sup>-7</sup>	9.38x10 <sup>-7</sup>	9.38x10 <sup>-7</sup>	9.38x10 <sup>-7</sup>	9.38x10 <sup>-7</sup>	9.38x10 <sup>-7</sup>	9.38x10 <sup>-7</sup>	9.38x10 <sup>-7</sup>	9.38x10 <sup>-7</sup>	9.38x10 <sup>-7</sup>
Tensão efetiva no topo - st (kPa)	0.0042	0.0042	0.0042	0.0042	0.0042	0.0042	0.0042	0.0042	0.0042	0.0042	0.0042	0.0042	0.0042	0.0042	0.0042	0.0042	0.0042	0.0042
Poropressão na base - Δub (kPa)	3.21	3.34	3.52	3.59	4.34	5.22	3.21	3.49	3.79	3.96	4.86	5.85	3.21	3.42	3.66	3.77	4.60	5.54
Tensão efetiva na base - sb (kPa)	3.24	3.39	3.58	3.66	4.42	5.31	3.25	3.54	3.85	4.03	4.94	5.95	3.24	3.46	3.71	3.84	4.69	5.64
Variação de altura do CP - Ha (cm)	0.759	1.282	1.357	1.512	1.515	1.518	0.99	1.17	0.95	1.05	1.01	1.03	0.87	1.02	1.17	1.28	1.39	1.41
Altura final do CP (cm)	1.981	2.218	2.423	2.938	3.425	3.952	2.32	2.58	3.16	3.77	4.19	4.35	2.36	2.78	2.86	3.31	3.45	3.64
Índice de vazios final - e <sub>fa</sub>	6.33	5.33	4.51	4.55	4.52	4.49	7.41	6.14	6.03	5.86	5.52	4.91	7.51	6.62	5.50	5.10	4.28	3.62

Tabela 4.10 – Dados do ensaio de carregamento em etapas

Dados da amostra	Teores de sólidos sem aditivos (%)						Teores de sólidos com coagulante (%)						Teores de sólidos com floculante (%)					
	8.5	11	13.5	16	18.5	21	8.5	11	13.5	16	18.5	21	8.5	11	13.5	16	18.5	21
Variação de altura do CP - Hc (cm):	0.2478	0.3752	0.5427	0.7544	0.9942	1.2458	0.2980	0.4666	1.0013	1.3588	1.4836	1.4910	0.6387	0.9154	0.9698	1.1202	1.0027	0.8999
Altura final do CP (cm):	1.7332	1.8428	1.8803	2.1836	2.4308	2.7062	2.0206	2.1170	2.1568	2.4095	2.7077	2.8605	1.7232	1.8628	1.8903	2.1936	2.4454	2.7362
Índice de vazios final - e <sub>fc</sub> :	5.4106261	4.2545079	3.273622	3.1268616	2.9194012	2.7642929	6.3270	4.8537	3.8038	3.3852	3.2125	2.8863	5.2075	4.1086	3.2934	3.0347	2.7452	2.4747

Tabela 4.11 – Dados do ensaio de permeabilidade por percolação

Dados da amostra	Teores de sólidos sem aditivos (%)						Teores de sólidos com coagulante (%)						Teores de sólidos com floculante (%)					
	8.5	11	13.5	16	18.5	21	8.5	11	13.5	16	18.5	21	8.5	11	13.5	16	18.5	21
Vazão de permeabilidade - qb (ml/min):	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
Velocidade - v (m/s):	9.38x10 <sup>-8</sup>	9.38x10 <sup>-8</sup>	9.38x10 <sup>-8</sup>	9.38x10 <sup>-8</sup>	9.38x10 <sup>-8</sup>	9.38x10 <sup>-8</sup>	9.38x10 <sup>-8</sup>	9.38x10 <sup>-8</sup>	9.38x10 <sup>-8</sup>	9.38x10 <sup>-8</sup>	9.38x10 <sup>-8</sup>	9.38x10 <sup>-8</sup>	9.38x10 <sup>-8</sup>	9.38x10 <sup>-8</sup>	9.38x10 <sup>-8</sup>	9.38x10 <sup>-8</sup>	9.38x10 <sup>-8</sup>	9.38x10 <sup>-8</sup>
Poropressão na base - Δub (kPa):	0.7500	1.1300	1.3800	1.8800	2.3100	2.7200	0.7433	1.1633	1.4621	2.0331	2.5410	2.9987	0.5625	1.2500	1.5375	1.7100	2.1500	2.3949
Carga hidráulica - Δh (m):	0.0765	0.1153	0.1408	0.1918	0.2357	0.2776	0.0758	0.1187	0.1492	0.2075	0.2593	0.3060	0.0574	0.1276	0.1569	0.1745	0.2194	0.2444
Coefficiente de permeabilidade - (m/s):	2.124x10 <sup>-6</sup>	1.499x10 <sup>-6</sup>	1.252x10 <sup>-6</sup>	1.067x10 <sup>-6</sup>	9.670x10 <sup>-7</sup>	9.142x10 <sup>-7</sup>	2.498x10 <sup>-6</sup>	1.672x10 <sup>-6</sup>	1.355x10 <sup>-6</sup>	1.089x10 <sup>-6</sup>	9.792x10 <sup>-7</sup>	9.766x10 <sup>-7</sup>	2,815x10 <sup>-6</sup>	1,369x10 <sup>-6</sup>	1,130x10 <sup>-6</sup>	1,179x10 <sup>-6</sup>	1,045x10 <sup>-6</sup>	1,050x10 <sup>-6</sup>

O algoritmo denominado SICTA desenvolvido na Universidade de Colorado está escrito na linguagem IBM *Mathematical Formula Translation System – Fortran*, linguagem de programação conhecida globalmente e que permitiu obter os parâmetros B e D, ambos sem unidades e são que independentes, o parâmetro Z tem unidades de tensão e permite um valor específico do índice de vazios com tensão efetiva zero (Equação 4.13). O parâmetro C tem unidades de coeficiente de permeabilidade e o parâmetro D é sem unidades. Os parâmetros relacionados aos seis teores de sólidos para os corpos de amostra estudados, obtidos através da simulação computacional, são apresentados na Tabela 4.12.

$e_0 = AZ^B$

4.13

Tabela 4.12 – Parâmetros constitutivos obtidos no ensaio HCT																		
Parâmetro	Teores de sólidos sem aditivos (%)						Teores de sólidos com coagulante (%)						Teores de sólidos com floculante (%)					
	8,5	11	13,5	16	18,5	21	8,5	11	13,5	16	18,5	21	8,5	11	13,5	16	18,5	21
A	6,62859	6,2131	14,17157	3,97881	9,0303	5,92216	7,77890	7,99072	4,64253	11,92835	10,87707	6,17559	7,54643	8,5131	10,89102	8,97433	4,84133	4,37125
B	-0,5239	-0,9773	-0,36809	-0,06223	-0,28801	-0,19624	-0,05334	-0,08963	-0,05143	-0,31886	-0,30847	-0,19548	-0,09579	-0,05763	-0,30470	-0,27705	-0,14638	-0,14667
Z (kPa)	0,00217	0,2284	5,45209	0,00005	2,46249	0,57434	0,00156	0,44730	0,00002	3,84482	4,00634	0,89353	0,02742	0,22840	2,58331	1,95988	0,14745	0,23580
C (m/s)	1,05x10 <sup>-4</sup>	1,40x10 <sup>-9</sup>	1,11x10 <sup>-4</sup>	9,52x10 <sup>-5</sup>	8,69x10 <sup>-5</sup>	8,26x10 <sup>-6</sup>	2,08 x10 <sup>-6</sup>	1,64 x10 <sup>-6</sup>	1,19 x10 <sup>-6</sup>	9,64 x10 <sup>-7</sup>	8,71 x10 <sup>-7</sup>	7,89x10 <sup>-7</sup>	5,29 x10 <sup>-12</sup>	4,19 x10 <sup>-14</sup>	1,00 x10 <sup>-7</sup>	1,06 x10 <sup>-6</sup>	9,46 x10 <sup>-7</sup>	9,59 x10 <sup>-7</sup>
D	1,1073	8	0,1	0,91648	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	8	8	0,1	0,1	0,1	0,1

As relações constitutivas foram construídas com base na Equação 5.6 (Liu e Znidarcic, 1991) cujas correspondências para o cálculo da compressibilidade são mostradas na Tabela 4.13 (e: índice de vazios) e na Equação 5.7 (Somogyi, 1979) junto com os parâmetros constitutivos para o cálculo da permeabilidade que são mostrados na Tabela 4.14 (k: permeabilidade). Ambas as equações são amplamente aceitas porque superariam formulações anteriores que apresentavam uma relação de vazio próxima ao infinito com estresse efetivo zero, aliás, a equação para o cálculo do coeficiente de permeabilidade é muito bem adequada para solos de baixa densidade.

Tabela 4.13 – Relações constitutivas para a compressibilidade obtidas no ensaio HCT			
Teor de Sólidos (%)	Relação para amostra sem aditivos	Relação para amostra com coagulante	Relação para amostra com floculante
8,5	$e = 6,62859 * (\sigma' + 0,00217)^{-0,52390}$	$e = 7,77890 * (\sigma' + 0,00156)^{-0,05334}$	$e = 7,54643 * (\sigma' + 0,02742)^{0,09579}$
11	$e = 6,21310 * (\sigma' + 0,22840)^{-0,97730}$	$e = 7,99072 * (\sigma' + 0,44730)^{-0,08963}$	$e = 8,5131 * (\sigma' + 0,22840)^{-0,05763}$
13,5	$e = 14,17157 * (\sigma' + 5,45209)^{-0,36809}$	$e = 4,64253 * (\sigma' + 0,00002)^{-0,05143}$	$e = 10,89102 * (\sigma' + 2,58331)^{-0,30470}$
16	$e = 3,97881 * (\sigma' + 0,00005)^{-0,06223}$	$e = 11,92835 * (\sigma' + 3,84482)^{-0,31886}$	$e = 8,97433 * (\sigma' + 1,95988)^{-0,27705}$
18,5	$e = 9,03030 * (\sigma' + 2,46249)^{-0,28801}$	$e = 10,87707 * (\sigma' + 4,00634)^{-0,30847}$	$e = 4,84133 * (\sigma' + 0,14745)^{-0,14638}$
21	$e = 5,92216 * (\sigma' + 0,57434)^{-0,19624}$	$e = 6,17559 * (\sigma' + 0,89353)^{-0,19548}$	$e = 4,37125 * (\sigma' + 0,23580)^{-0,14667}$

Tabela 4.14 – Relações constitutivas para a permeabilidade obtidas no ensaio HCT			
Teor de Sólidos (%)	Relação para amostra sem aditivos	Relação para amostra com coagulante	Relação para amostra com floculante
8,5	$k = 1,0474x10^{-4} * e^{1,10730}$	$k = 2,0772x10^{-6} * e^{0,10000}$	$k = 5,2930x10^{-12} * e^{8,0000}$
11	$k = 1,3951x10^{-9} * e^{8,00000}$	$k = 1,6384x10^{-6} * e^{0,10000}$	$k = 4,1930x10^{-14} * e^{8,00000}$
13,5	$k = 1,1120x10^{-4} * e^{0,10000}$	$k = 1,1855x10^{-6} * e^{0,10000}$	$k = 1,0030x10^{-6} * e^{0,10000}$
16	$k = 9,5203x10^{-5} * e^{0,91648}$	$k = 9,6399x10^{-7} * e^{0,10000}$	$k = 1,0551x10^{-6} * e^{0,10000}$
18,5	$k = 8,6877x10^{-5} * e^{0,10000}$	$k = 8,7133x10^{-7} * e^{0,10000}$	$k = 9,4630x10^{-7} * e^{0,10000}$
21	$k = 8,2582x10^{-6} * e^{0,10000}$	$k = 7,8845x10^{-7} * e^{0,10000}$	$k = 9,5903x10^{-7} * e^{0,10000}$

Abu-Hejleh *et al.* (1996) trabalhou com ensaios HCT para pesquisar e obter as relações de índice de vazios-tensão efetiva e índice de vazios-permeabilidade para vários tipos de argilas fosfáticas muito moles. Estes resultados foram utilizados como fundamento para sua aplicação e obtenção de resultado dos parâmetros construtivos computados e as equações obtidas para o cálculo do índice de vazios para o traçado das curvas de compressibilidade para os seis teores de sólidos com valores de 0,1 a 1000 kPa, dados que foram utilizados depois para o cálculo da permeabilidade, tendo como objetivo a concepção das curvas de permeabilidade.

### ***Efeito da salinidade da amostra no adensamento e na permeabilidade***

A influência da salinidade na deposição das partículas já tinha sido evidenciada nos ensaios de sedimentação, verificada como um comportamento da elevação do índice de vazios ao final da sedimentação. Visando verificar a influência da salinidade também no processo de adensamento, foram realizados 2 novos ensaios HCT. Em um, utilizaram-se amostras com teor de sólidos de 16%, mais o coagulante com uma dosagem de 60 ppm. No outro ensaio foi colocado o floculante, com 80 ppm de dosagem. A Tabela 4.15 apresenta os parâmetros relacionados à amostra dessalinizada, obtidos através da simulação computacional, da mesma maneira que foram obtidos na Tabela 4.12.

Tabela 4.15 – Parâmetros constitutivos obtidos no ensaio HCT em amostras dessalinizadas  
Teor de Sólidos de 16 %

Parâmetro	Salino		Dessalinizado	
	Com coagulante	Com floculante	Com coagulante	Com floculante
A	11,92835	8,97433	6,38587	13,98919
B	-0,31886	-0,27705	-0,05458	-0,26198
Z (kPa)	3,84482	1,95988	0,00037	3,56337
C (m/s)	$9,64 \times 10^{-7}$	$1,06 \times 10^{-6}$	$7,16 \times 10^{-7}$	$5,65 \times 10^{-7}$
D	0,1	0,1	0,1	0,1

As relações constitutivas foram construídas com base na Equação 5.6 (Liu e Znidarcic, 1991) cujas correspondências para o cálculo da compressibilidade são mostradas na Tabela 4.16 e na Equação 5.7 (Somogyi, 1979) junto com os parâmetros constitutivos para o cálculo da permeabilidade que são mostrados na Tabela 4.17 (*k*: permeabilidade).

Tabela 4.16 – Relações constitutivas para a compressibilidade obtidas no ensaio HCT em amostras dessalinizadas

Teor de Sólidos de 16 %		Relações de Índice de vazios
Salina	Com coagulante	$e = 11,92835 * (\sigma' + 3,84482)^{-0,31886}$
	Com floculante	$e = 8,97433 * (\sigma' + 1,95988)^{-0,27705}$
Dessalinizado	Com coagulante	$e = 6,38587 * (\sigma' + 0,00037)^{-0,05458}$
	Com floculante	$e = 13,98919 * (\sigma' + 3,56337)^{-0,26198}$

Tabela 4.17 – Relações constitutivas para a permeabilidade obtidas no ensaio HCT em amostras dessalinizadas

Teor de Sólidos de 16 %		Relações de Permeabilidade
Salina	Com coagulante	$k = 9,6399 \times 10^{-7} * e^{0,10000}$
	Com floculante	$k = 1,0551 \times 10^{-6} * e^{0,10000}$
Dessalinizado	Com coagulante	$k = 7,1555 \times 10^{-7} * e^{0,10000}$
	Com floculante	$k = 5,6504 \times 10^{-7} * e^{0,10000}$

## CAPÍTULO 5

### ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

#### 5.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo abrange uma análise do processo de sedimentação e adensamento visando uma associação entre a salinidade e o processo de floculação, que é uma das questões avaliadas, tentando compreender o mecanismo de interação que existe nas partículas quando elas começam o estágio de floculação. Depois de haver ensaiado três agentes, sulfato de alumínio, sulfato de ferro e C-498 para aperfeiçoar o processo de sedimentação dos rejeitos de fosfato que se encontram em uma solução salina, sendo de muita importância o valor da salinidade e a quantidade de doses do coagulante e do floculante. Assim, na atualidade, uma preocupação é proteger os recursos naturais e a engenharia mostra-se preocupada com o meio ambiente, especialmente com o uso da água, sendo um desafio a sua reciclagem quando se trabalha com rejeitos, tornando-se uma necessidade desenvolver tecnologias para reaproveitar a água que passa pelo processo de osmose inverso, porém mantendo ainda um alto teor de salinidade (Quinn *et al.*, 2007; Moreno *et al.*, 2011).

#### 5.2 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS

##### 5.2.1 Análise dos resultados dos ensaios de sedimentação em coluna

A Figura 5.1 apresenta o resumo da análise realizada no desempenho geral dos dois coagulantes inorgânicos, sulfato de alumínio e sulfato de ferro (II), destacando que o sulfato de alumínio apresentou um melhor desempenho do que o sulfato de ferro (II). Mostra-se a curva típica do rejeito de fosfato e o comportamento do teor de sólidos ao longo do ensaio dividido em 4 fases. A primeira acontece no estágio de floculação, o teor de sólidos da amostra ( $S_w$ ) é igual ao teor de sólidos inicial do ensaio ( $S_{wi}$ ). Na segunda, no estágio de sedimentação, quando as partículas estão descendo, observa-se que o teor

de sólidos da amostra ( $S_w$ ) é maior do que o teor de sólidos na sedimentação ( $S_{wo}$ ), devido a uma porcentagem das partículas que já estão adensadas. Porém, em uma fase em que existe uma linha imaginária, nas quais os estágios de sedimentação e adensamento são fusionados, o teor de sólidos da amostra ( $S_w$ ) é igual ao teor de sólidos dessa fase ( $S_{wo}$ ). A última fase acontece no estágio de adensamento onde o teor de sólidos da amostra ( $S_w$ ) é menor do que o teor de sólidos no adensamento ( $S_{wo}$ ). Os teores de sólidos foram calculados de acordo com o APÊNDICE I.

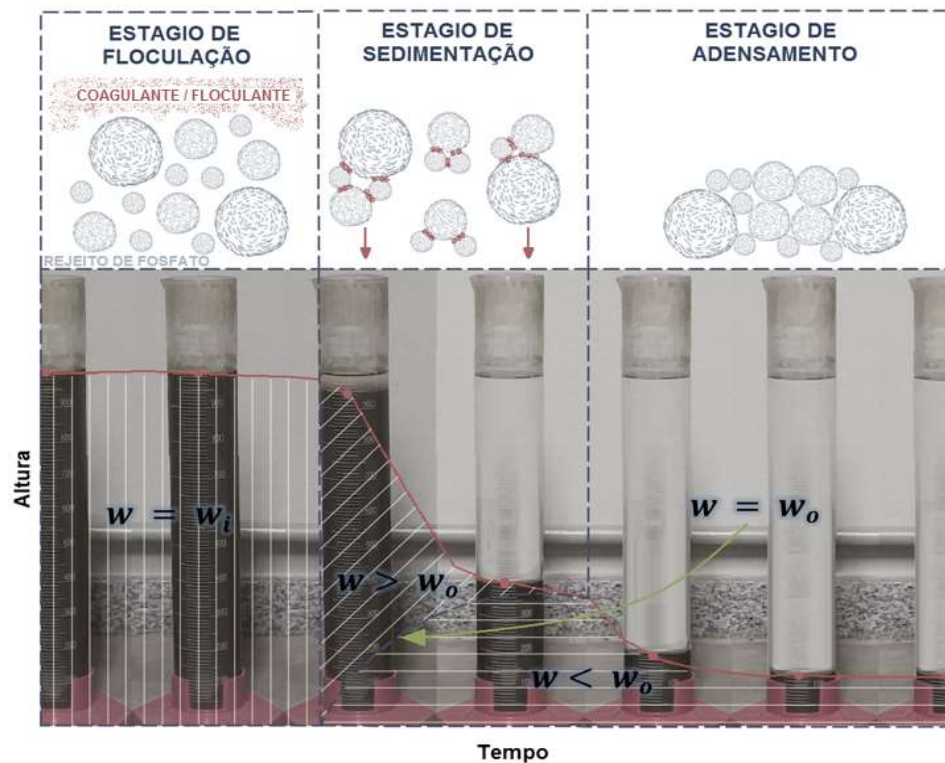


Figura 5.1 - Interpretação gráfica dos ensaios de coluna para amostras de rejeitos de fosfato com aditivos

Em referência ao teor de umidade, a fase acontece no estágio de floculação, o teor de umidade da amostra ( $w$ ) é igual ao teor de umidade inicial do ensaio ( $w_i$ ). Na segunda fase, no estágio de sedimentação, quando as partículas estão descendo, mostra-se que o teor de umidade na sedimentação ( $w$ ) é maior do que o teor de umidade da amostra ( $w_o$ ), devido a uma porcentagem das partículas que já estão adensadas. Porém, uma fase em que existe uma linha imaginária onde os estágios de sedimentação e adensamento são fusionados nessa etapa, o teor de umidade da amostra ( $w$ ) igual ao teor de umidade no estágio de sedimentação ( $w_o$ ). A última fase acontece no estágio de adensamento onde o teor de umidade do adensamento ( $w$ ) é menor do que o teor de umidade da amostra ( $w_o$ ).

#### *A. Análise dos resultados dos ensaios entre coagulantes inorgânicos*

O rejeito de fosfato na sua estrutura química possui um radical constituído de um átomo de fósforo e quatro átomos de oxigênio. Os íons fosfato são íons poliatômicos, apresentam uma forma esférica e harmoniza-se no cristal do mesmo jeito que comportam íons monoatômicos com carga formal -3 (Atkins, 2012). Tornando o rejeito com uma carga negativa, a primeira premissa foi então utilizar um coagulante carregado positivamente, cadeias eletrolíticas catiônicas, ajeitando as cargas elétricas em estado de repouso para a rápida criação de pontes eletricamente atrativas. A segunda premissa foi considerar coagulantes que tenham uma compatibilidade química além da carga elétrica e, finalmente, a última premissa correspondente à facilidade na sua aplicação na indústria.

Os coagulantes selecionados foram o sulfato de alumínio e o sulfato de ferro (II), e foram escolhidos pelas suas cargas elétricas, cuja propriedade física foi fundamental para determinar as interações eletromagnéticas que aconteceriam durante a floculação, pela sua afinidade química em referência à existência do fosfato de alumínio (aluminofosfatos) e o fosfato de ferro (ferrofosfatos) ionicamente estáveis ao não ter capacidade de troca iônica, pois possuem carga estrutural balanceada, enfim, a abrangente utilização destes no campo industrial e pela aprovação de vários autores (O'Melia, 1972; Dolejs, 1989; Boisvert, 1997; O'Melia *et al.*, 1999; Cooke *et al.*, 2005; Zhou, 2008; Kadooka, 2017; Rybak, 2017).

O APÊNDICE J mostra as tabelas com os resultados obtidos na velocidade de sedimentação ao longo do ensaio de coluna durante os 13 dias que durou cada ensaio, tempo padronizado depois de ter feito alguns ensaios prévios e avaliação para um modelo para ser reproduzido no futuro, além de mostrar qual foi a velocidade máxima para cada um dos 39 ensaios realizados com dosagens dos dois coagulantes em proporções de 20 ppm, 40 ppm, 60 ppm, 80 ppm, 100 ppm e 120 ppm, além do estado natural, para teores de sólidos de 8,5%, 11% e 13,5%. É importante indicar que os teores de 16%, 18,5% e 21% não continuaram só para o sulfato de ferro ao mostrar um baixo desempenho, motivo pelo qual concluiu-se os ensaios em um teor de sólidos de 13,5%. Os valores apresentados estão organizados de tal forma que permitam fazer uma comparação direta em referência dos tempos com colunas contíguas que mostram o desempenho em estado natural, com

aplicação de sulfato de alumínio e com sulfato de ferro (II).

A Tabela 5.1 mostra o resumo das máximas velocidades obtidas dos ensaios de coluna feitos, ressalta o bom desempenho do sulfato de alumínio de até mais de 50% de efetividade frente ao seu concorrente. Isso significa que na floculação as partículas finas do rejeito em suspensão presentes na água se agregam e formam flocos muito mais rápido ao agregar o sulfato de alumínio devido à melhor disposição das partículas, que se encontram superficialmente carregadas negativamente, originadas das ligações quebradas de superfícies. O rejeito ao estar constituído pelo composto químico pentóxido de difósforo ( $P_2O_5$ ), cuja formação molecular é realizada por instáveis forças de Van Der Waals origina uma cadeia cristalina de ânions de oxigênio que tem uma longitude entre o centro do núcleo do átomo até o elétron estável mais distante do mesmo, maior do que os cátions, determinando a predominância de cargas negativas. A ação do sulfato de alumínio, que desempenhou uma melhor floculação, ao contrabalancear as cargas negativas do rejeito, mesmo tendo o sulfato de ferro uma molécula de  $Fe^{+3}$  para ser atraída pelas cargas negativas do rejeito não conseguiu o mesmo resultado do que o  $Al^{+3}$ .

Tabela 5.1 – Velocidades de sedimentação máximas para Sw de 8,5%, 11% e 13,5% ao longo do ensaio de coluna com sulfato de alumínio e sulfato de ferro (II)

Conc. em ppm	Velocidade Máxima (cm/min)								
	Sw=8,5 %			Sw=11 %			Sw=13,5 %		
	Natural	Sulfato de Alumínio	Sulfato de Ferro	Natural	Sulfato de Alumínio	Sulfato de Ferro	Natural	Sulfato de Alumínio	Sulfato de Ferro
20	0,17	0,25	0,08	0,07	0,10	0,07	0,08	0,09	0,08
40	0,17	0,27	0,17	0,07	0,13	0,05	0,08	0,11	0,08
60	0,17	0,40	0,10	0,07	0,10	0,05	0,08	0,09	0,08
80	0,17	0,33	0,08	0,07	0,09	0,05	0,08	0,10	0,08
100	0,17	0,13	0,13	0,07	0,11	0,06	0,08	0,17	0,08
120	0,17	0,13	0,13	0,07	0,10	0,05	0,08	0,12	0,08
<b>Máx</b>	<b>0,17</b>	<b>0,40</b>	<b>0,17</b>	<b>0,07</b>	<b>0,13</b>	<b>0,07</b>	<b>0,08</b>	<b>0,17</b>	<b>0,08</b>

Segundo Pereira (2017), dos ensaios com rejeito dessalinizado, outro fenômeno que acontece aqui é a influência da salinidade que possui o rejeito, uma salinidade em média de 4576 ppm, e foi comprovado nos ensaios de coluna que o cloreto de sódio é um sal que tem a característica de melhorar as condições de floculação ao possuir uma excelente propriedade osmótica originando uma pressão osmótica, apartando a solução do rejeito em soluto (a polpa) e solvente (a água), atuando na floculação como um agente que tenta



dividir em duas partes a solução, uma menos concentrada (ou solvente puro) e outra com solução mais concentrada. Porém, ao se misturar o cloreto de sódio com o coagulante, uma segunda característica surge da salinidade, que é poder reduzir significativamente a repulsão eletrostática que existe entre as finas partículas sólidas carregadas negativamente, acelerando o processo de floculação ao aumentar a atração elétrica formando os flocos mais rápido e ainda maiores, gerando uma velocidade de sedimentação mais elevada do que no estado natural. A Figura 5.2 apresenta as curvas obtidas da análise e a comparação dos coagulantes empregados nesta etapa em relação à velocidade e ao tempo ao longo do ensaio para o teor de sólidos mais representativo.

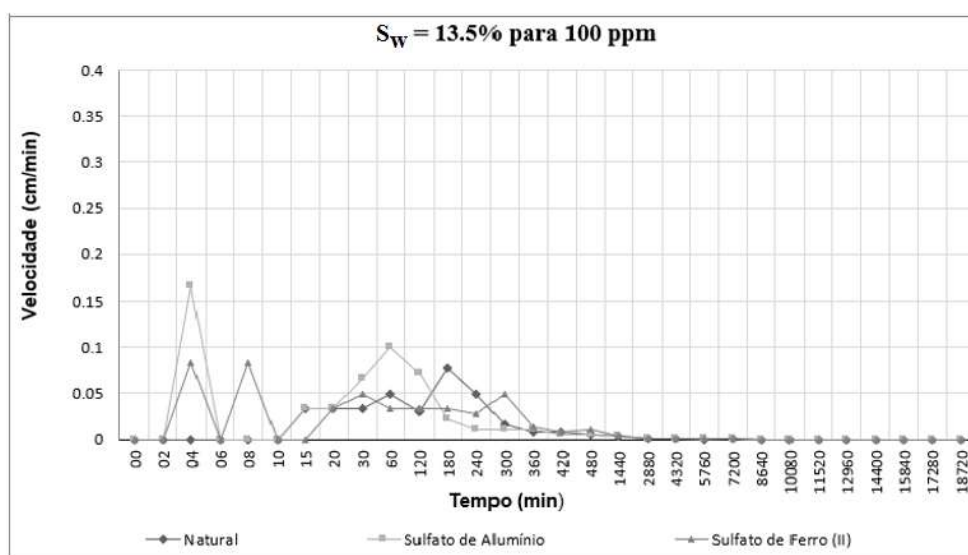


Figura 5.2 - Curvas das velocidades máximas de sedimentação para Sw de 13,5% com todas as concentrações de sulfato de alumínio e sulfato de ferro (II)

#### B. Análise dos resultados dos ensaios com uso de coagulante inorgânico e floculante orgânico

A estrutura química do rejeito estudado apresenta um radical constituído de um átomo de fósforo e quatro átomos de oxigênio. De acordo com Atkins (2012), os íons fosfato são íons poliatômicos, íons que contêm mais de um átomo, apresentam uma forma esférica e harmonizam-se no cristal do mesmo jeito que comporiam íons monoatômicos, que contêm somente um átomo, com carga formal -3. Conhecendo já as premissas sobre o tipo de carga elétrica, a consideração sobre as propriedades do coagulante e do floculante a utilizar e finalmente a facilidade na sua aplicação na indústria. Já selecionado o sulfato

de alumínio como melhor representante dos coagulantes para as condições particulares na realização dos ensaios. Pela carga negativa do rejeito, a escolha do floculante orgânico foi por ser um polímero catiônico de alto peso molecular altamente eficaz, condicionado para desenvolver um melhor arranjo dos sólidos para operações de desidratação e que ajudem nos processos de reuso da água, especialmente para a indústria da mineração. Considerando esses argumentos, o C-498 foi selecionado. Além de apresentar outros benefícios, como o uso econômico pela relação de eficácia e baixas dosagens, não mostra modificação significativa do pH no sistema e a melhora da produção de sólidos no lodo final.

No APÊNDICE K as tabelas apresentam os resultados obtidos da velocidade de sedimentação ao longo do ensaio de coluna durante os 13 dias que durou cada ensaio, além de mostrar qual foi a velocidade máxima para cada um dos 78 ensaios realizados com dosagens do coagulante e do floculante em proporções de 20 ppm, 40 ppm, 60 ppm, 80 ppm, 100 ppm e 120 ppm, além do estado natural, para teores de sólidos de 8,5% a 21%. O C-498 mostrou uma aceleração já no estágio de floculação, aumentando precipitadamente a velocidade de sedimentação, caso contrário do seu competidor, o sulfato de alumínio, que apresentou o seu melhor desempenho no estágio de sedimentação. Isso foi devido a dois mecanismos que aconteceram durante a floculação e foram evidentes durante o registro de dados e avaliação do ensaio de coluna para esses dois agentes. O sulfato de alumínio objetiva a neutralização de carga que está envolvida, principalmente para o coagulante de baixo peso molecular e alta densidade. O mecanismo de funcionamento do C498 apresentou pontes de polímeros para o polieletrólito de alto peso molecular e baixa densidade, formado por um tipo de rede tridimensional hidrofílica que atua rapidamente e cria ligações pela polimerização, aumentando a densidade das partículas do rejeito de fosfato, o que permitiu decantá-las.

Pereira (2017) realizou ensaios com amostras dessalinizadas para 4 diferentes teores de sólidos aleatórios para uma comparação com o rejeito original sedimentado, dos resultados obtidos e comparados com a tendência das equações realizadas da plotagem dos resultados, obtida matematicamente, para os mesmos valores de teores de sólidos, o autor observou que o cloreto de sódio, presente na polpa, colabora como um agente floculante na sedimentação dos rejeitos. Para a faixa de teores de sólidos analisada, o simples procedimento físico utilizado no processo de dessalinização incrementou o

volume do material sedimentado ao redor de 20%, A baixa taxa de sedimentação do material não está de modo direto associada à presença do cloreto de sódio, aliás, esse sal age no propósito de contribuir na deposição dos rejeitos,

A Tabela 5.2 mostra as velocidades ótimas (a velocidade máxima de todas as velocidades de sedimentação com diferentes dosagens de coagulante ou floculante). Distingue-se o comportamento do C-498 frente ao sulfato de alumínio com uma diferença de efetividade de até 8 vezes mais efetivo do que o inorgânico, já comparado com o estado natural que foi de até 10 vezes (quando  $Sw=11\%$  e concentração 80 ppm). Isto representa que ao agregar o C-498 para a floculação das partículas finas do rejeito em suspensão presentes na água, elas se agregaram aceleradamente e formaram muito rápido complexos intermoleculares de diferente estequiometria, devido às altas potencialidades de adsorção, que impedem que as partículas entrem no interior da estrutura ou rearranjo do floco, o que resulta em uma estrutura de floco mais aberta, melhorando o volume dos flocos devido à melhor disposição das partículas e o polímero, cujos monômeros são acrilamidas<sup>2</sup>, atua como um hidrogel que aumenta a densidade de partículas suspensas.

A Tabela 5.3 apresenta os valores selecionados dos melhores desempenhos ao serem comparados à sedimentação do rejeito sem aplicação de nenhum agente com os dois tipos de floculantes, baseados nas máximas velocidades de sedimentação que atingiram cada um, utilizando a dosagem necessária para obter a dita velocidade, para os teores de sólidos de 8,5%, 11%, 13,5%, 16%, 18,5% e 21%. Fundamentado nos resultados obtidos, o floculante orgânico demonstrou ser até 8 vezes melhor do que inorgânico, por exemplo para um teor de 21% e uma concentração de 120 ppm. O desempenho é o valor registrado em porcentagem do benefício de utilizar coagulante ou floculante na velocidade de sedimentação relacionado com a velocidade de sedimentação natural (sem agentes coagulantes e floculantes).

---

<sup>2</sup> Um sólido cristalino de caráter biodegradável que deriva do ácido acrílico e é da função orgânica amida.

Tabela 5.2 – Velocidades de sedimentação máximas para os 6 teores de sólidos ao longo do ensaio de coluna com sulfato de alumínio e C-498

Sw (%)	Conc, (ppm)	Salinidade (ppm)	Velocidade Máxima (cm/min)			Desempenho (%)	
			Natural	Sulfato de Alumínio	C-498	Sulfato ao Natural	C-498 ao Natural
8,5	20	4576	0,17	0,25	0,50	32,00	65,86
	40	4576	0,17	0,27	0,83	37,04	79,52
	60	4576	0,17	0,40	1,00	57,50	82,93
	80	4576	0,17	0,33	0,66	48,48	74,40
	100	4576	0,17	0,13	0,40	-30,77	57,33
	120	4576	0,17	0,14	0,50	-21,43	65,86
11	20	4576	0,08	0,10	0,66	20,00	87,95
	40	4576	0,08	0,13	0,83	38,46	90,36
	60	4576	0,08	0,10	0,83	20,00	90,36
	80	4576	0,08	0,09	0,91	11,11	91,24
	100	4576	0,08	0,11	0,66	27,27	87,95
	120	4576	0,08	0,10	0,83	20,00	90,36
13,5	20	4576	0,08	0,09	0,17	11,11	51,81
	40	4576	0,08	0,11	0,20	27,27	59,84
	60	4576	0,08	0,09	0,33	11,11	75,90
	80	4576	0,08	0,10	0,50	20,00	83,94
	100	4576	0,08	0,17	0,33	52,94	75,90
	120	4576	0,08	0,12	0,42	33,33	80,72
16	20	4576	0,08	0,08	0,42	0,00	80,72
	40	4576	0,08	0,08	0,42	0,00	80,72
	60	4576	0,08	0,17	0,33	52,94	75,90
	80	4576	0,08	0,09	0,50	11,11	83,94
	100	4576	0,08	0,17	0,37	52,94	78,09
	120	4576	0,08	0,10	0,33	20,00	75,90
18,5	20	4576	0,08	0,08	0,33	0,00	75,90
	40	4576	0,08	0,08	0,33	0,00	75,90
	60	4576	0,08	0,17	0,50	52,94	83,94
	80	4576	0,08	0,08	0,42	0,00	80,72
	100	4576	0,08	0,08	0,66	0,00	87,95
	120	4576	0,08	0,08	0,50	0,00	83,94
21	20	4576	0,08	0,08	0,25	0,00	67,87
	40	4576	0,08	0,08	0,42	0,00	80,72
	60	4576	0,08	0,08	0,25	0,00	67,87
	80	4576	0,08	0,08	0,17	0,00	51,81
	100	4576	0,08	0,08	0,33	0,00	75,90
	120	4576	0,08	0,08	0,50	0,00	83,94

Tabela 5.3 – Melhores velocidades de sedimentação e desempenhos para os 6 teores de sólidos ao longo do ensaio de coluna com sulfato de alumínio e C-498

Sw (%)	Sulfato de Alumínio			C-498		
	Conc. (ppm)	Velocidade (cm/min)	Desempenho (%)	Conc. (ppm)	Velocidade (cm/min)	Desempenho (%)
8,5	60	0,40	57,50	60	1,00	82,93
11	40	0,13	38,46	80	0,91	91,24
13,5	100	0,17	52,94	80	0,50	83,94
16	60	0,17	52,94	80	0,50	83,94
18,5	60	0,17	52,94	100	0,66	87,95
21	-	0,08	0,00	120	0,50	83,94

A Figura 5.3 apresenta o gráfico da relação da velocidade e do tempo ao longo do ensaio de coluna, representando o desempenho de cada floculante empregado e comparando-se também com o ensaio de coluna em condições naturais, no qual não foi utilizado nenhum agente auxiliar para otimizar a sedimentação, além da própria salinidade, que no caso do floculante orgânico foi até 10 vezes mais efetivo do que o estado natural (quando  $Sw = 11\%$  e concentração 80 ppm). No estágio de floculação, sucede-se que, ao apresentar uma melhor carga catiônica dentre esses dois agentes, o coagulante adsorve satisfatoriamente via interações eletrostáticas a carga negativa das partículas, porém o floculante apresentou pontes de polímeros formando complexos intermoleculares de diferente estequiometria.

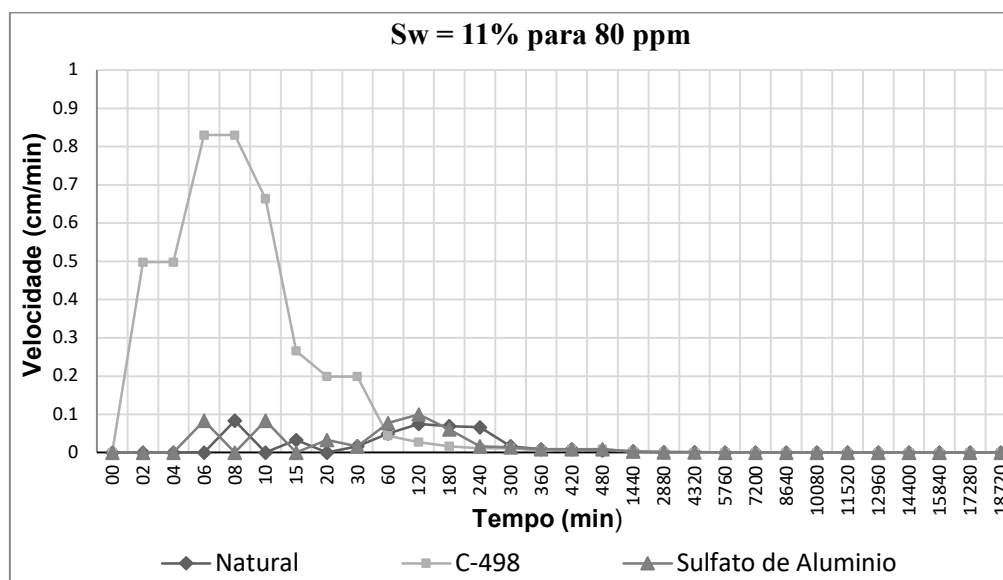


Figura 5.3 - Curvas das velocidades de sedimentação para  $Sw$  de 11% com todas as concentrações de sulfato de alumínio e C-498

*C. Análise dos resultados dos ensaios em condições de secado em estufa e em condições naturais*

Nessa fase, o rejeito na etapa de laboratório foi acondicionado de acordo com as condições climáticas extraordinárias no campo da área de estudo, ou seja, ele foi seco a 35°C e novamente hidratado, para fazer uma comparação com os resultados obtidos dos ensaios de coluna e os valores do rejeito em polpa natural, e com os valores utilizando sulfato de alumínio como coagulante para analisar os 4 comportamentos e avaliar os resultados em condições extremas e condições normais. O APÊNDICE L mostra as tabelas de um total de 84 ensaios, nos quais conseguiu-se determinar que o rejeito em condições de secagem em estufa teve um melhor desempenho do que o estava em polpa natural quando trabalhados com teores baixos como 8,5% e 11%, do mesmo jeito que aconteceu com o uso do coagulante nos rejeitos secos em estufa e em polpa natural teve um melhor desempenho do que o rejeito em polpa natural para todos os teores incluído 21%, e esses valores são ainda melhores nos que não se utilizou o coagulante.

A Tabela 5.4 mostra os maiores valores das tabelas antecessoras, que foram obtidos dos estágios do processo de sedimentação, dos valores máximos da velocidade de sedimentação que pode se inferir em que o sulfato de alumínio mostrou mais efetividade em condições no qual o rejeito foi seco na estufa do que aquele em condições naturais. Porém, ao aumentar o teor de sólidos esta vantagem vai se perdendo sutilmente até atingir valores similares com seus concorrentes. O sulfato de alumínio conseguiu uma velocidade máxima de 0,75 cm/min para uma concentração de 80 ppm e um teor de sólidos de 8,5% em condições de seco na estufa, sendo que em condições naturais só conseguiu atingir 0,40 cm/min para concentração de 60 ppm com o mesmo teor de sólidos. Pode-se perceber que na maioria dos casos os melhores resultados são para concentrações que oscilam entre 60 e 80 ppm.

Tabela 5.4 – Velocidades de sedimentação máximas para os 6 teores de sólidos ao longo do ensaio de coluna com sulfato de alumínio para rejeito secado e normal

Sw (%)	Conc. (ppm)	Velocidade Máxima (cm/min)				Desempenho (%)		
		Condições Normais		Condições em estufa		Normal	Condições em estufa	
		Natural	Sulfato de Alumínio	Natural	Sulfato de Alumínio	Sulfato de Alumínio	Natural	Sulfato de Alumínio
8,5	20	0,17	0,25	0,33	0,33	32,00	48,48	48,48
	40	0,17	0,27	0,33	0,43	37,04	48,48	60,47
	60	0,17	0,40	0,33	0,42	57,50	48,48	59,52
	80	0,17	0,33	0,33	0,75	48,48	48,48	77,33
	100	0,17	0,13	0,33	0,42	-30,77	48,48	59,52
	120	0,17	0,14	0,33	0,50	-21,43	48,48	66,00
11	20	0,08	0,10	0,17	0,17	20,00	52,94	52,94
	40	0,08	0,13	0,17	0,17	38,46	52,94	52,94
	60	0,08	0,10	0,17	0,25	20,00	52,94	68,00
	80	0,08	0,09	0,17	0,17	11,11	52,94	52,94
	100	0,08	0,11	0,17	0,17	27,27	52,94	52,94
	120	0,08	0,10	0,17	0,17	20,00	52,94	52,94
13,5	20	0,08	0,09	0,08	0,17	11,11	0,00	52,94
	40	0,08	0,11	0,08	0,08	27,27	0,00	0,00
	60	0,08	0,09	0,08	0,17	11,11	0,00	52,94
	80	0,08	0,10	0,08	0,17	20,00	0,00	52,94
	100	0,08	0,17	0,08	0,17	52,94	0,00	52,94
	120	0,08	0,12	0,08	0,08	33,33	0,00	0,00
16	20	0,08	0,08	0,08	0,08	0,00	0,00	0,00
	40	0,08	0,08	0,08	0,08	0,00	0,00	0,00
	60	0,08	0,17	0,08	0,13	52,94	0,00	38,46
	80	0,08	0,09	0,08	0,08	11,11	0,00	0,00
	100	0,08	0,17	0,08	0,08	52,94	0,00	0,00
	120	0,08	0,10	0,08	0,10	20,00	0,00	20,00
18,5	20	0,08	0,08	0,08	0,08	0,00	0,00	0,00
	40	0,08	0,08	0,08	0,08	0,00	0,00	0,00
	60	0,08	0,17	0,08	0,08	52,94	0,00	0,00
	80	0,08	0,08	0,08	0,10	0,00	0,00	20,00
	100	0,08	0,08	0,08	0,08	0,00	0,00	0,00
	120	0,08	0,08	0,08	0,08	0,00	0,00	0,00
21	20	0,08	0,08	0,08	0,08	0,00	0,00	0,00
	40	0,08	0,08	0,08	0,08	0,00	0,00	0,00
	60	0,08	0,08	0,08	0,17	0,00	0,00	52,94
	80	0,08	0,08	0,08	0,10	0,00	0,00	20,00
	100	0,08	0,08	0,08	0,08	0,00	0,00	0,00
	120	0,08	0,08	0,08	0,08	0,00	0,00	0,00

A Tabela 5.5 apresenta os valores selecionados dos melhores desempenhos ao serem comparados com suas respectivas condições, sem aplicação de nenhum agente como sulfato de alumínio, baseados nas máximas velocidades de sedimentação que atingiram cada um, utilizando a dosagem necessária para obter a dita velocidade, para os seis teores de sólidos. Como previsto, melhores desempenhos foram obtidos do rejeito seco com o uso de coagulante. Isto é, devido à maturação dos cristais do fosfato como já tem sido estudado (Ramaroson *et al.*, 2009, 2012; Dia *et al.*, 2019). Contudo, os fosfatos bem cristalizados têm uma estrutura mais estável e a caga melhor definida, conseguindo melhor atração nas interações eletrostáticas (cargas elétricas em estado de repouso) que as cargas negativas que são adsorvidas satisfatoriamente pela carga catiônica do sulfato.

Tabela 5.5 – Melhores velocidades de sedimentação e desempenhos para os 6 teores de sólidos ao longo do ensaio de coluna para rejeito secado e normal

Sw (%)	Com uso de coagulante					
	Condições Normais			Condições em estufa		
	Conc. (ppm)	Velocidade (cm/min)	Desempenho (%)	Conc. (ppm)	Velocidade (cm/min)	Desempenho (%)
8,5	60	0,40	57,50	80	0,75	77,33
11	40	0,13	38,46	60	0,25	68,00
13,5	100	0,17	52,94	20	0,17	52,94
16	60	0,17	52,94	60	0,13	38,46
18,5	60	0,17	52,94	80	0,10	20,00
21	-	0,08	0,00	60	0,17	52,94

A Figura 5.4 apresenta as curvas de velocidades de sedimentação para teores de sólidos baixos nos quais claramente pode-se observar maior velocidade para um teor de 8,5% do que seus concorrentes. As curvas reafirmaram que os ensaios com amostras secadas em estufa tiveram bons resultados, aliás, os resultados com melhor desempenho foram com o uso de sulfato de alumínio, como explicado anteriormente por causa da compatibilidade da carga elétrica.



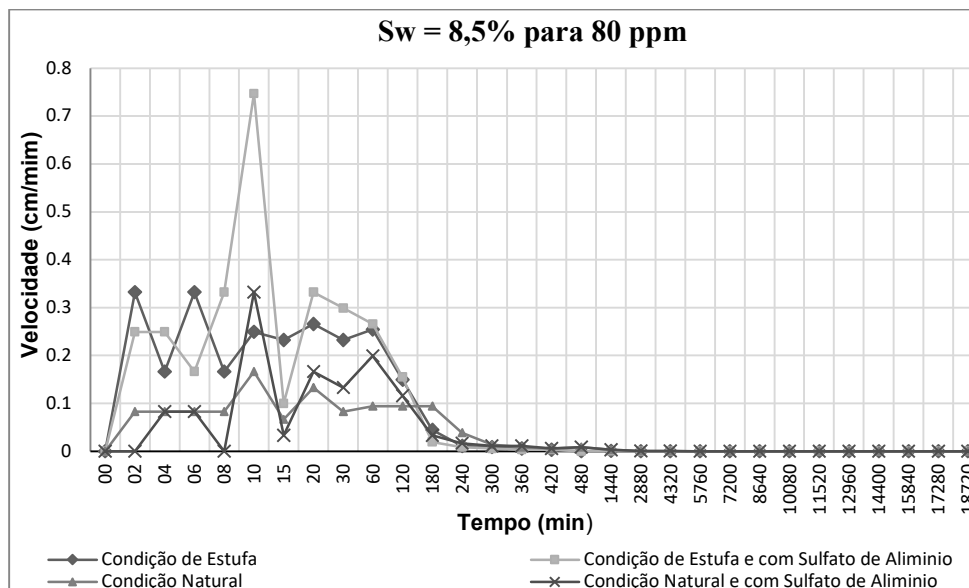


Figura 5.4 - Curvas das velocidades de sedimentação para Sw de 8,5% com todas as concentrações de sulfato de alumínio para rejeito secado e natural

#### D. Análise dos resultados dos ensaios entre coagulante e floculante em amostra dessalinizada

Os ensaios de sedimentação para o cálculo da velocidade que foram feitos nas amostras dessalinizadas, com um teor de salinidade 40 vezes menor do que a amostra original, já previam o modo de se comportar conclusivo do aumento do valor do índice de vazios ao final da sedimentação, isto é, evidenciou a influência da salinidade na floculação e na deposição das partículas, as quais ficaram com uma altura de sólidos maior do que as que mantiveram a sua salinidade. Objetivando verificar a influência da salinidade no processo de sedimentação, foram realizados dois novos ensaios de coluna, utilizando o teor de sólidos da amostra de 16% que deu melhores resultados na interação com o coagulante e o floculante, com dosagens de 60 ppm e 80 ppm respectivamente.

A Tabela 5.6 apresenta os resultados das velocidades de sedimentação relacionadas às amostras com salinidade natural e dessalinizada, resultados obtidos através da Equação 4.5 que calcula a relação do deslocamento e o tempo. Os valores obtidos apresentam velocidades reduzidas em quase 50% quando reduzida a salinidade da amostra e agregado aditivos (coagulante ou floculante) para a formação de flocos. Os ensaios reafirmam que o conteúdo de salinidade influencia diretamente no processo de sedimentação, apresentando desempenhos por baixo dos valores das amostras com salinidade natural.

Tabela 5.6 – Velocidades com coagulante e floculante para amostras com salinidade natural e amostras dessalinizadas

Aditivo	Salinidade Natural			Dessalinizada		
	Conc. (ppm)	Velocidade (cm/min)	Desempenho (%)	Conc. (ppm)	Velocidade (cm/min)	Desempenho (%)
Sulfato de Alumínio	60	0,17	52,94	60	0,08	25,85
C-498	80	0,50	83,94	80	0,25	41,80

A Figura 5.5 mostra as curvas obtidas das velocidades ao longo do ensaio com as amostras dessalinizadas e, além disso, foram colocadas as curvas obtidas com as amostras com salinidade natural, mostrando graficamente que as partículas das amostras dessalinizadas sedimentaram mais lentamente do que as amostras com salinidade natural, ao serem aplicados aditivos como o coagulante Sulfato de Alumínio e o floculante C-498.

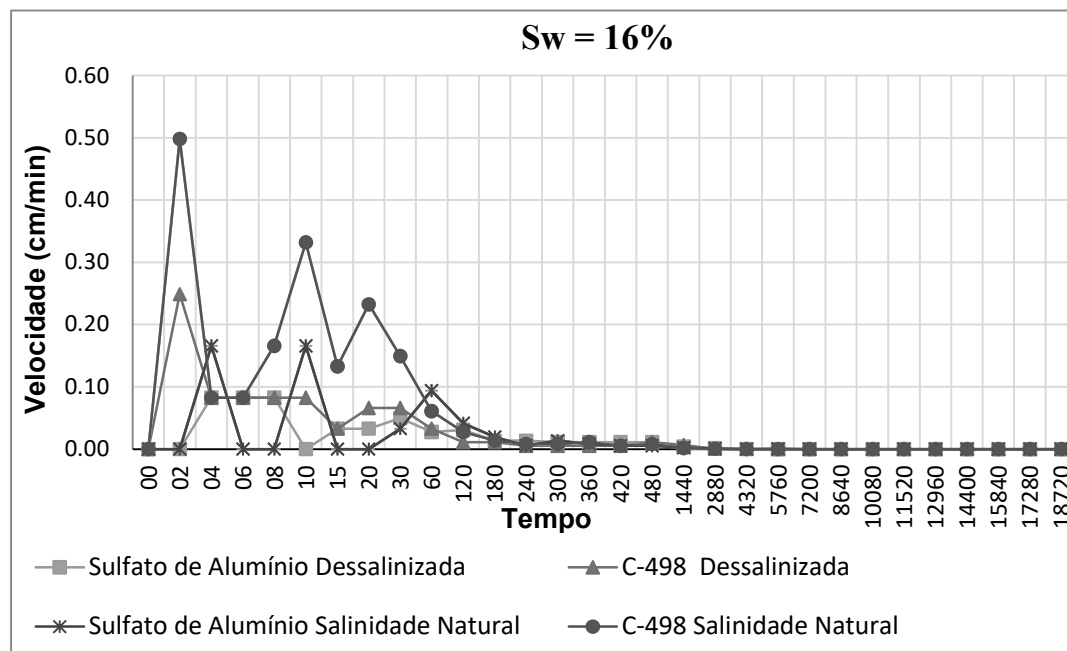


Figura 5.5 - Curvas das velocidades de sedimentação ao longo do ensaio para Sw de 16% com coagulante e floculante para amostras com salinidade natural e dessalinizadas

#### E. Análise dos resultados dos ensaios de coluna e ensaios de Jar Test

Uma das vantagens do ensaio de coluna é o acompanhamento ao longo de um período prolongado, isso ajuda a entender melhor o comportamento de sedimentação nos diferentes estágios do material. Já seu concorrente, o ensaio de Jar Test, permite uma

melhor agitação do aditivo que auxilia a formação de flocos, permitindo uma programação exata e a medição da turbidez ao longo do ensaio, facilitando a seleção de coagulantes ou floculantes e suas dosagens quando vai se iniciar uma pesquisa.

Comparando os resultados das velocidades dos ensaios com o uso de aditivos, evidenciaram-se velocidades próximas. Os valores da velocidade obtidos para os ensaios de Jar Test apresentaram-se ligeiramente superiores do que os ensaios de coluna, isto provavelmente pela agitação programada de acordo com os protocolos do laboratório de Saneamento Ambiental da UFOP como explicado no item 4.4.3.

Tabela 5.7 – Velocidades com coagulante e floculante para amostras em Ensaio de Coluna e *Jar Test*

Tempo (min)	Velocidade (cm/min)			
	Coagulante		Floculante	
	Coluna	Jar Test	Coluna	Jar Test
10	0.17	0.18	0.33	0.33
20	0.00	0.01	0.23	0.24
30	0.03	0.03	0.15	0.14

## 5.2.2 Análise dos resultados dos ensaios HCT

### *Apresentação e discussão dos resultados para as amostras naturais*

Avaliando as tensões desde 0,1 kPa a Figura 5.6 mostra as curvas de índice de vazios-tensão efetiva para uma comparação entre os 18 ensaios para permitir avaliar os comportamentos dos teores de sólidos, 6 realizados sem aditivos, 6 com coagulante e 6 com floculante. O adensamento das partículas do rejeito de baixa densidade começa com tensões efetivas muito pequenas que são principalmente induzidas pela aplicação de um pequeno gradiente hidráulico no corpo de prova. Porém, teores com baixo conteúdo de sólidos apresentam curvas com um índice de vazios mais elevado e baixas tensões efetivas quando não usados aditivos, isso por causa de não terem formado flocos que melhorem o arranjo e ajudem a reduzir os espaços entre as partículas.

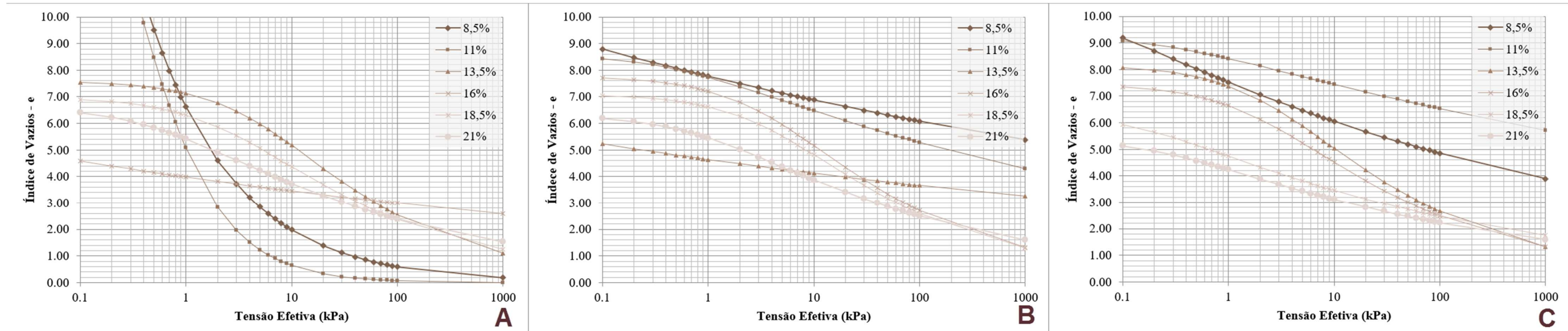


Figura 5.6 - Curvas de compressibilidade dos corpos de prova ensaiados (A sem aditivos; B com coagulante; C com floculante)

Avaliando as tensões desde 0,001 kPa, a Figura 5.7A apresenta os teores de sólidos 8,5 % e 11% com valores para o índice de vazios de 135 e 26 respectivamente. O comportamento da curva de 11% sem floculante se mostra já constante para uma tensão de 0,01 kPa, porém a de 8,5% ainda não conseguiu se estabilizar. As Figuras 5.7B e 5.7C apresentam as curvas mais suavizadas e estabilizadas com um índice de vazios mais próximo aos teores com maior conteúdo de sólidos, em uma faixa de 8 e 11, visto que as partículas têm formado flocos com um volume maior, consequentemente reduzindo os espaços entre as partículas.

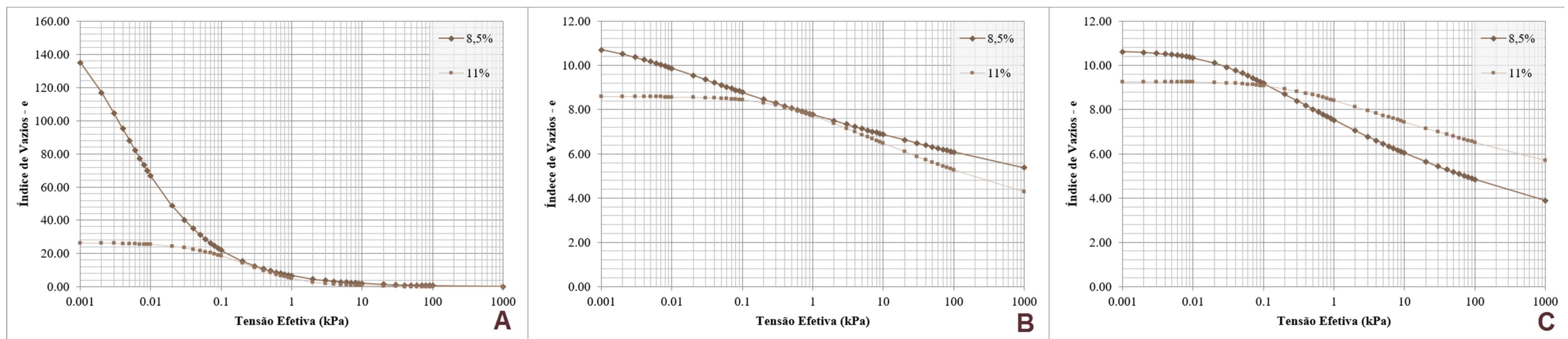


Figura 5.7 - Curvas de compressibilidade para os corpos de prova ensaiados com Sw de 8,5% e 11% (A, sem aditivos; B com coagulante; C, com floculante)

A Figura 5.8 apresenta as curvas para os demais teores de sólidos, avaliando as tensões desde 0,001 kPa que apresentaram índices de vazios mais próximos para uma tensão efetiva de 0,001 kPa, em uma faixa de 6 a 8 de valores para o índices de vazios. Ainda a Figura 5.8A e Figura 5.8B apresentam um comportamento diferente para o teor de sólidos de 16% e 13,5% respectivamente, já na figura 5.8C todos os teores apresentaram um comportamento estável. Isto poderia ser consequência da velocidade de sedimentação e do adensamento das partículas do rejeito de baixa densidade, com tensões efetivas muito pequenas, que são principalmente induzidas pela aplicação de um pequeno gradiente hidráulico no corpo de prova.



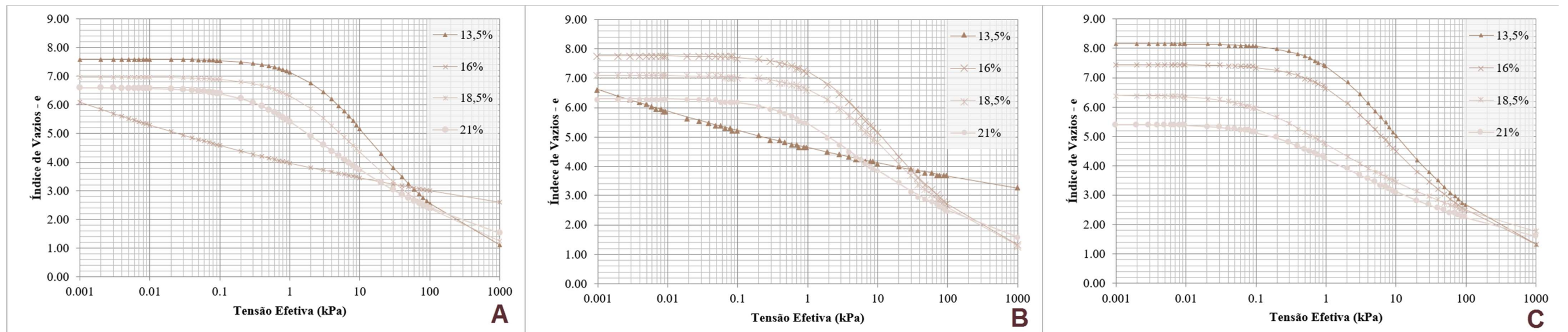


Figura 5.8 - Curvas de compressibilidade para os corpos de prova ensaiados com Sw de 13,5% a 21% (A, sem aditivos; B com coagulante; C, com flocculante)

Na Figura 5.9A, porém, a curva do teor de sólidos de 16% apresentou uma diferença considerável frente à suas concorrentes, o que levou a atingir uma tensão efetiva de 10-5 kPa para obter 7,36 de índice de vazios, mostrando que este teor tende a atingir tensões efetivas muito baixas para obter um índice de vazios estável. Quando aplicado coagulante, o comportamento foi diferenciado para o teor de sólidos de 13,5% atingindo uma tensão efetiva de 10-5 kPa para obter 8.08 de índice de vazios, neste caso, mostrando também que este teor tende a atingir tensões efetivas muito baixas para obter um índice de vazios estável (Figura 5.9B). No caso do flocculante, os teores de sólidos de 13,5% e 16% apresentaram, respectivamente, valores de 8,06 e 7,35 para o índice de vazios, para uma tensão efetiva de 10-2 kPa, o que mostra que o flocculante auxilia a diminuir as tensões efetivas durante o processo de adensamento (Figura 5.9C).

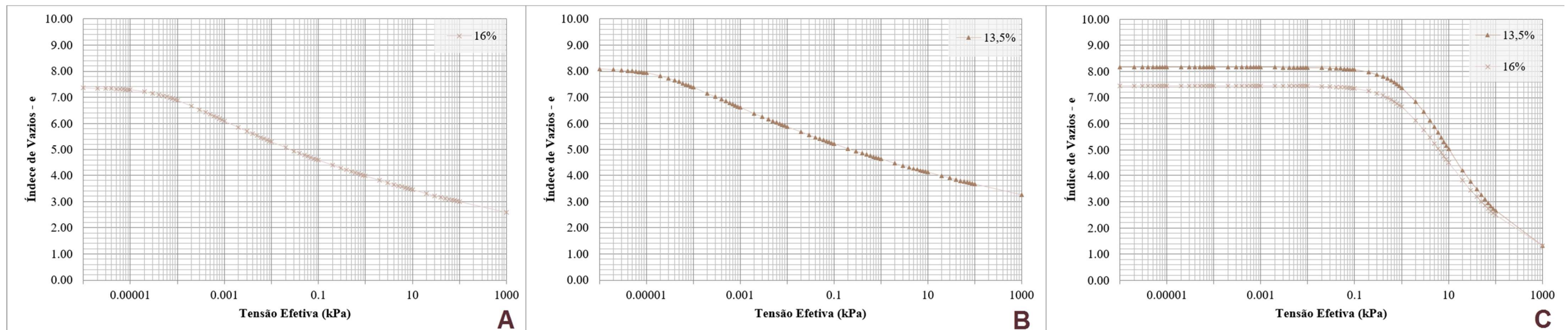


Figura 5.9 – Curvas específicas de compressibilidade para o corpo de prova (A, sem aditivos, Sw de 16%; B com coagulante, Sw de 13,5%; C, com flocculante, Sw de 13,5% e 16%)

A aplicação da Equação 4.7 permitiu obter os valores da condutividade hidráulica para realizar as curvas em relação ao índice de vazios, mostradas na Figura 5.10, o que demonstrou que, dependendo do teor de sólidos, elas tendem a ser estáveis mais rapidamente e com uma condutividade menor. A Figura 5.10A e Figura 5.10C apresentam as curvas para os teores 8,5% e 11% com uma tendência diferente dos outros teores, devido a que essas curvas apresentam valores muito altos no índice de vazios, refletido no coeficiente hidráulico também alto, o que indica uma alta permeabilidade. Também, as curvas da Figura 5.10B e Figura 5.10C nas quais foram utilizados coagulante e flocculante, as curvas dos teores de 18,5% e 21% estão quase sobrepostas. Porém, as curvas com coagulante se mostraram mais próximas e estáveis do que as

concorrentes, isto pode ser atribuído ao processo de formação química dos flocos e a seu comportamento durante o adensamento induzido por percolação.

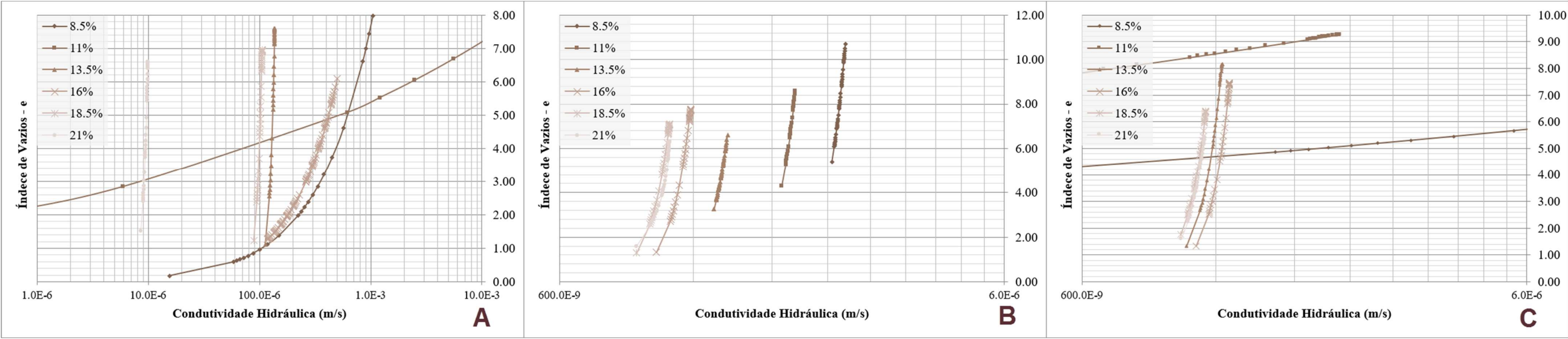


Figura 5.10 - Curvas de permeabilidade dos corpos de prova ensaiados (A sem aditivos; B com coagulante; C com floculante)

A Figura 5.11 apresenta as curvas dos teores de 8,5% e 11% devido ao seu comportamento diferenciado visto na avaliação das curvas do índice de vazios e tensão efetiva, estes teores apresentam baixos coeficientes hidráulicos diferenciados das outras curvas, isto devido aos valores baixos do teor de sólidos além de ser mais marcante nas curvas nas quais não foi utilizado nenhum aditivo que auxilie a formação de flocos para melhorar a propriedade de sedimentação do corpo de prova durante a etapa de preparação do ensaio de adensamento por percolação induzida (Figura 5.11A). As curvas com coagulante e floculante (Figura 5.11B e Figura 5.11C). apresentaram bons resultados, porém as com floculante apresentaram valores levemente melhores.

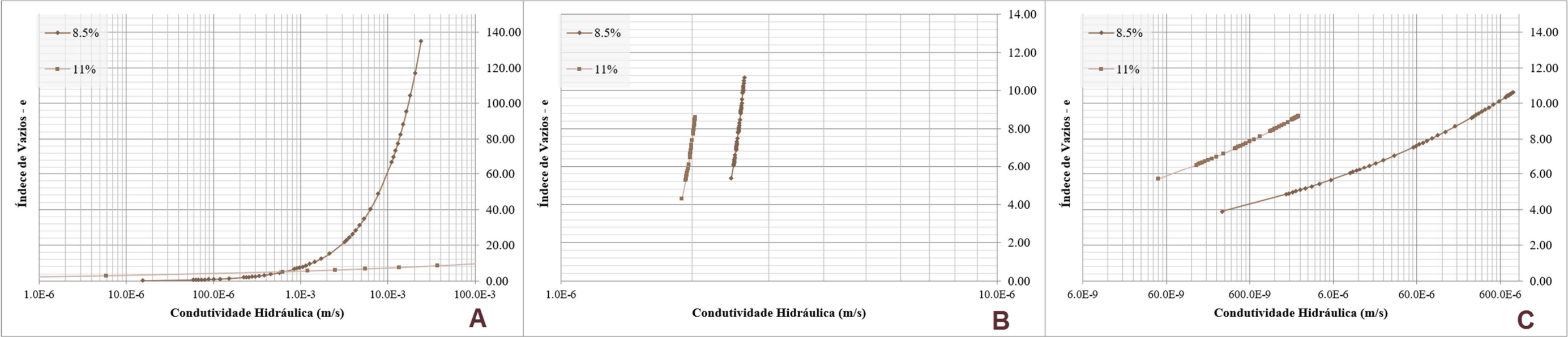


Figura 5.11 - Curvas de permeabilidade para os corpos de prova ensaiados com Sw de 8,5% e 11% (A sem aditivos; B com coagulante; C com floculante)

A Figura 5.12 apresenta as curvas dos teores de 13,5%, 16%, 18,5% e 21% com condutividade hidráulica mais próxima do que as de 8,5% e 11%. Porém, se ressalta que com o uso de floculante as curvas ficam ainda mais aproximadas, em segundo lugar com o uso de coagulante também as curvas parecem próximas, já em último lugar as curvas sem aditivos apresentam-se mais distanciadas, com tendências diferentes e valores baixos.



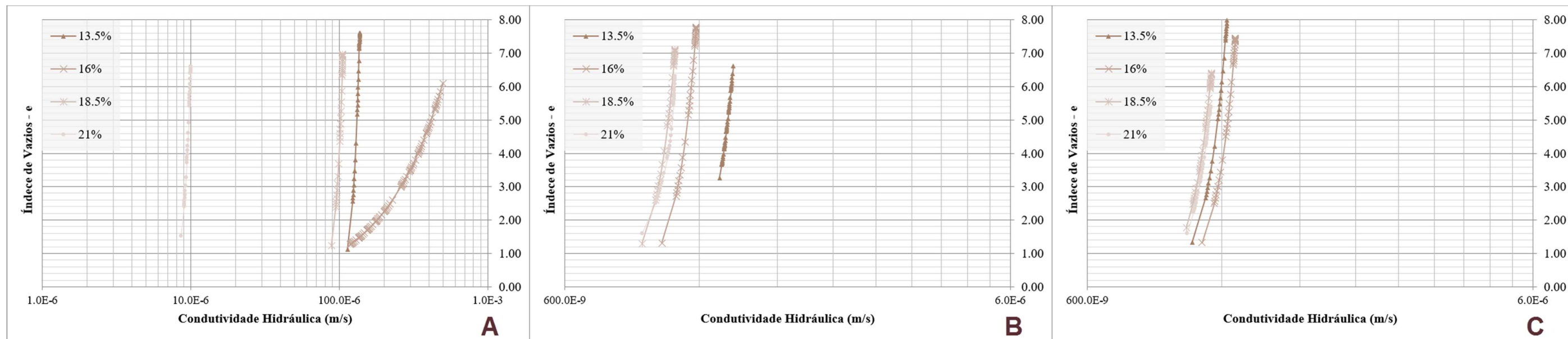


Figura 5.12 - Curvas de permeabilidade para os corpos de prova com  $S_w$  de 13,5% a 21% (A sem aditivos; B com coagulante; C com floculante)

A Figura 5.13 representa uma curva isolada típica de condutividade hidráulica durante a etapa de adensamento induzido por percolação para um teor de sólidos de 16% para tensões efetivas de 0,001 kPa e os índices de vazios correspondentes. As Figuras 5.13B e Figura 5.13C apresentam um comportamento muito similar com valores muito próximos entre eles, para o coagulante de  $1,18 \times 10^{-6}$  m/s e para o floculante de  $1,29 \times 10^{-6}$  m/s. Já a Figura 5.13A teve um valor baixo de  $4,99 \times 10^{-4}$  m/s expressando uma facilidade para que a água no rejeito se movimente.

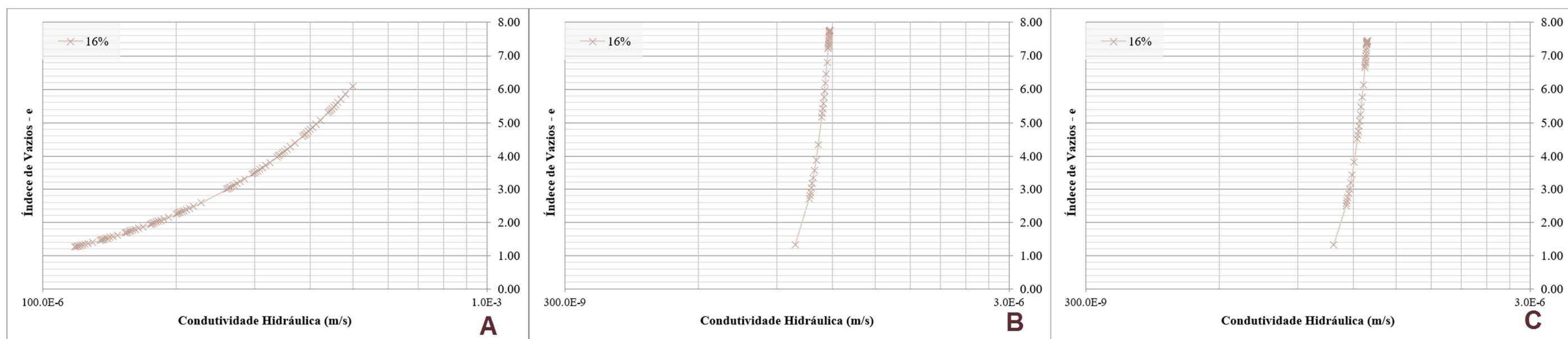


Figura 5.13 - Curva de permeabilidade para o corpo de prova com  $S_w$  de 16% (A sem aditivos; B com coagulante; C com floculante)

## Apresentação e discussão dos resultados para as amostras dessalinizadas

As curvas tensão efetiva versus índice de vazios e permeabilidade versus índice de vazios são mostradas nas Figuras 5.13 e 5.14, respectivamente, sendo construídas através das relações constitutivas extraídas dos modelos matemáticos de Liu e Znidarcic (1991) e Somogyi (1979) e apresentadas nas Tabelas 4.16 e 4.17. As curvas de compressibilidade e permeabilidade foram comparadas às curvas obtidas para as amostras naturais (rejeitos obtidos em condições naturais, coletados diretamente no ponto de descarga).

A Figura 5.14 apresenta as curvas obtidas dos ensaios HCT para corpos de prova ensaiados com um teor de sólidos de 16%, nos quais duas amostras foram dessalinizadas para avaliar o comportamento do rejeito no processo de adensamento e consolidação, procurando achar os valores de índices de vazios para realizar uma comparação com o rejeito com salinidade oriunda do beneficiamento. Os resultados mostram que o rejeito ao ser dessalinizado apresenta um maior índice de vazios como consequência dos diferentes estágios da sedimentação que são influenciados pela eliminação da carga elétrica que outorga o cloreto de sódio ao rejeito.

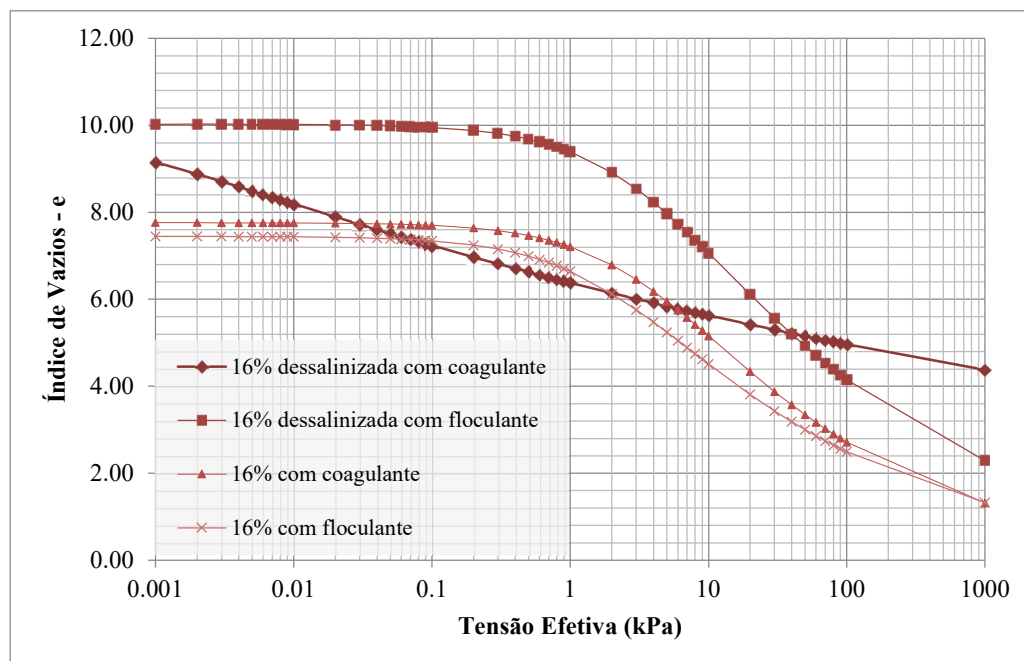


Figura 5.14 – Comparação das curvas de compressibilidade dos corpos de prova com salinidade oriunda do beneficiamento e dessalinizadas



A Figura 5.15 apresenta as curvas obtidas da relação do índice de vazios vs condutividade hidráulica. Ensaios HCT foram realizados com corpos de prova com um teor de sólidos de 16% e as amostras foram dessalinizadas para comparar os comportamentos com as de suas concorrentes que mantêm a salinidade oriunda do beneficiamento. Durante o processo de adensamento e consolidação conseguiu-se os valores de índices de vazios e os da condutividade hidráulica.

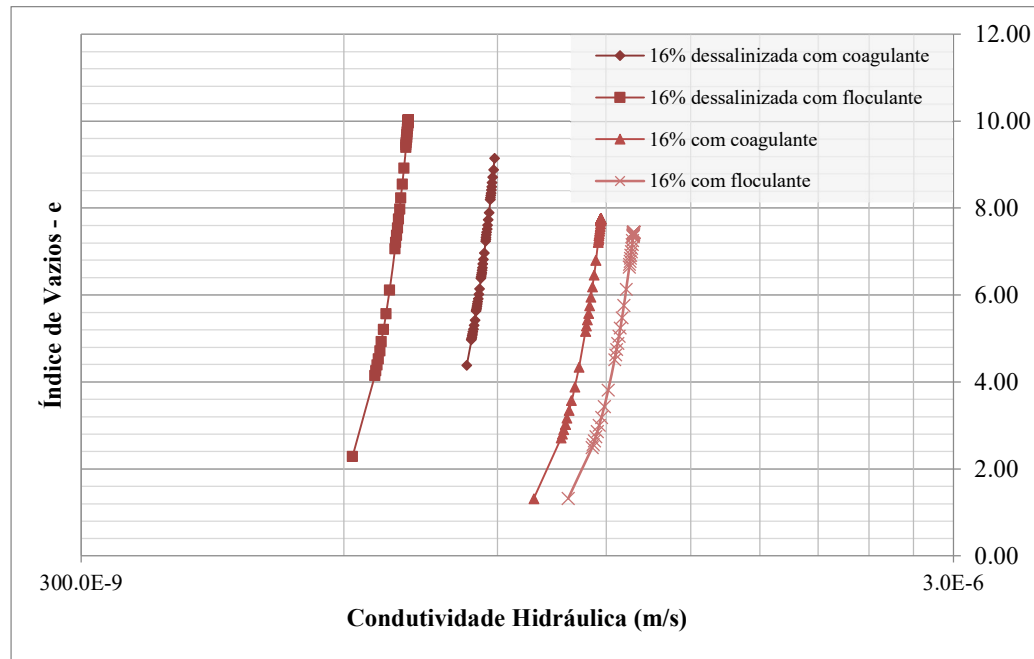


Figura 5.15 – Comparação das curvas de permeabilidade dos corpos de prova com salinidade oriunda do beneficiamento e dessalinizadas

Os resultados mostram que o rejeito, ao ser dessalinizado, apresenta menores valores de condutividade hidráulica como consequência dos diferentes estágios da sedimentação que são influenciados pela eliminação da carga elétrica que outorga o cloreto de sódio ao rejeito. Visto que durante os ensaios com amostras com salinidade oriunda do beneficiamento o cloreto de sódio mostrou significativa incorporação de seus íons no rejeito, o que tem dado como resultado um aumento dos sólidos durante a sedimentação.

### 5.3 SIMULAÇÕES DE ENCHIMENTO DE TANQUE

Uma modelagem teórica para o rejeito de fosfato que experimenta adensamentos a grandes deformações foi formulada. Porém, esta fase teve uma complexidade que precisou de uma modelagem numérica que foi lograda mediante a aplicação de uma ferramenta computacional. Com suporte na Tabela 4.15 que contém os parâmetros constitutivos obtidos no ensaio HCT em amostras com salinidade oriunda do beneficiamento e amostras dessalinizadas com teor de sólidos de 16 %, conseguiu-se realizar a simulação de enchimento pelo software CONDES0, desenvolvido por Yao e Znidarcic (1997).

O CONDES0 é um programa computacional que consiste em um algoritmo numérico para análise de adensamento unidimensional a grandes deformações, oferecendo uma solução de uma equação diferencial parcial de segunda ordem não linear. Soluções unidimensionais transientes são fornecidas também pelo programa, perfis da distribuição dos índices de vazios ao longo da camada de rejeitos e, como complemento, efeitos de ressecamento e dos mecanismos de propagação de trincas. Também podem ser obtidos os perfis de poropressões reproduzidas e as espessuras das camadas por todo o adensamento.

Quatro simulações foram feitas considerando a salinidade e o aditivo que foi colocado para formação dos flocos:

- Simulações de enchimento com amostra com coagulante.
- Simulações de enchimento com amostra com floculante.
- Simulações de enchimento com amostra dessalinizada com coagulante.
- Simulações de enchimento com amostra dessalinizada com floculante.

Para essa simulação, levou-se em consideração o enchimento escalonado do tanque, aceitou-se que todo o rejeito fosse lançado instantaneamente, representando as condições reais de operação do tanque. Não obstante, não simular as condições reais de operação do empreendimento, a simulação orienta a análise precedente do comportamento do rejeito em relação à consolidação durante o período de enchimento, tendo em consideração a altura final de armazenamento.

Nesse cenário, foi considerado cada uma das camadas e seu processo de adensamento, uma diminuição do volume do rejeito de fosfato, tendo em consideração uma nova altura. Ao acontecer esta redução de volume aparece um espaço para ser preenchido com o lançamento para dar origem à seguinte camada. Ressalta-se que o material estudado possui uma compressibilidade significativa, e é avaliado nas quatro simulações que foram realizadas. As particulares apreciações das alturas permitem conseguir as curvas mais aproximadas às atividades em campo.

Como realizado por Pereira (2017), também foi seguido o procedimento da sequência do cálculo com 17 estágios para a simulação de enchimento escalonado corrigido do Tanque TK-105 tendo em consideração a linearização das curvas altura versus índice de vazios, altura versus teor de sólidos e cota versus poropressão. Esta avaliação considerou um volume de rejeito lançado para um determinado período, dados que foram ingressados ao CONDES0, com um tempo inicial conhecido (zero), também o tempo final equivalente ao período adotado e finalmente uma taxa de enchimento sendo igual à altura nominal, a qual está dividida pelo tempo.

Uma altura igual a zero foi considerada para a simulação, além de conseguir a altura final correspondente ao Estágio 1, que é menor do que a altura nominal, o que se deve ao adensamento experimentado pela camada. Durante o procedimento, a nova altura se superpõe à curva altura versus índice de vazios, conseguindo um novo índice de vazios que está relacionado com o volume, sendo agora o novo estágio para próxima camada.

A Figura 5.16 mostra as diferentes curvas dos perfis de índices de vazios após adensamento para cada estágio da simulação do enchimento escalonado corrigido no Tanque TK-105. Para facilitar a comparação entre as curvas, essas são indicadas com uma letra na ordem de simulações de enchimento com amostra com coagulante (A), simulações de enchimento com amostra com floculante (B), simulações de enchimento com amostra dessalinizada com coagulante (C), simulações de enchimento com amostra dessalinizada com floculante (D).

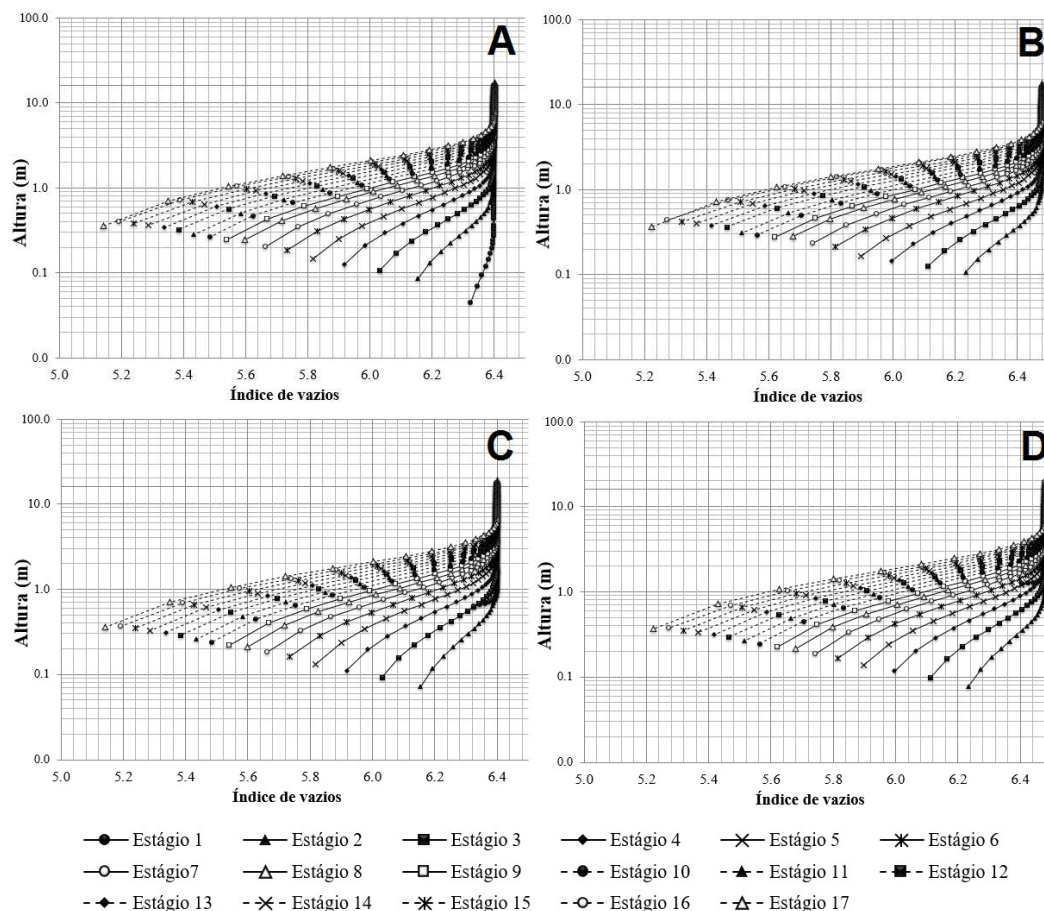


Figura 5.16 – Comparação dos perfis de índices de vazios após adensamento para cada estágio da simulação do enchimento escalonado corrigido feitos no Tanque TK-105

A Figura 5.17 apresenta uma comparação entre os perfis referentes à relação de altura versus teor de sólidos, obtidos como dados de saída do CONDES0 para as simulações de enchimento com amostra com coagulante (A), simulações de enchimento com amostra com floculante (B), simulações de enchimento com amostra dessalinizada com coagulante (C), simulações de enchimento com amostra dessalinizada com floculante (D), depois de obtidos os arquivos tipo \*.out, que podem ser abertos em um leitor compatível com uma folha eletrônica de cálculo.

Cada um dos dezessete estágios realizados está referenciado aos tempos acumulados necessários para se alcançar cada nível de enchimento, isto por causa do lançamento constante do rejeito. Assim, as simulações da Figura 5.15 foram sistematizadas para obter uma base de dados dos perfis, que são relativos aos consecutivos estágios e foram obtidos desde a altura nominal, proporcionado pela curva de enchimento, e da própria taxa de enchimento.

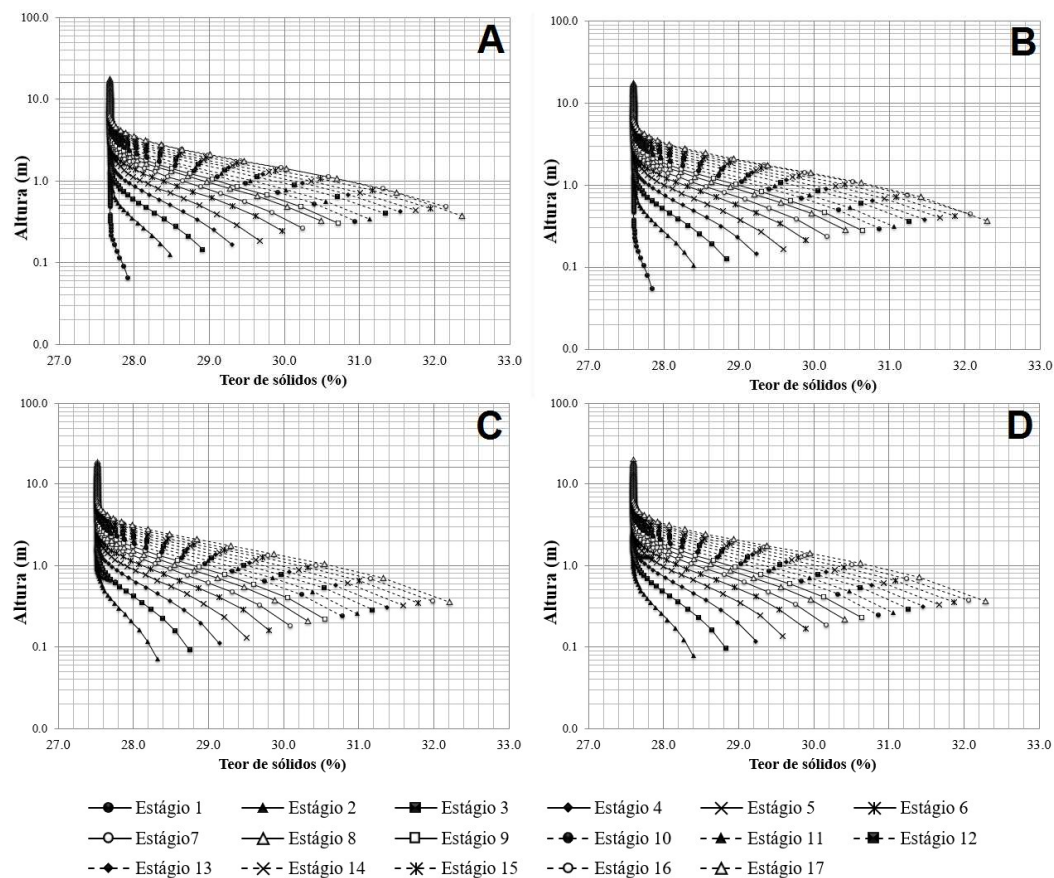


Figura 5.17 – Comparação dos perfis de teor de sólidos após adensamento para cada estágio da simulação do enchimento escalonado corrigido feitos no Tanque TK-105

A Figura 5.18 apresenta uma comparação entre os perfis referente à relação de cota versus poropressão, obtida com os dados de saída do CONDES0 para as simulações de enchimento com amostra com coagulante (A), simulações de enchimento com amostra com floculante (B), simulações de enchimento com amostra dessalinizada com coagulante (C), simulações de enchimento com amostra dessalinizada com floculante (D).

Observa-se que as condições com salinidade oriunda do processo de beneficiamento com coagulante e floculante apresentaram uma poropressão menor do que aquelas amostras dessalinizadas e com os mesmo aditivos formadores de flocos. Essa comparação fortalece a capacidade da aplicação dos parâmetros constitutivos obtidos no ensaio de adensamento induzido por percolação para prever a capacidade de armazenagem de próximos reservatórios na atividade de disposição final.

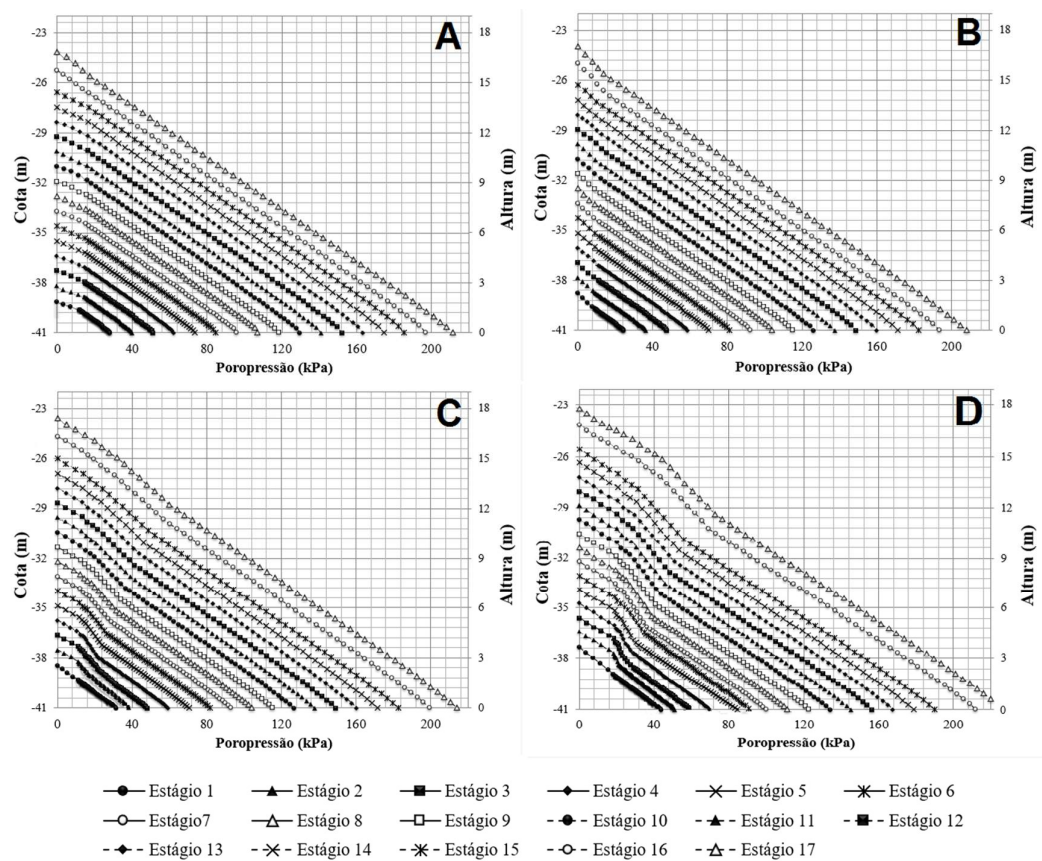


Figura 5.18 – Comparação dos perfis de poropressão após adensamento para cada estágio da simulação escalonada corrigida feitos no Tanque TK-105

## **CAPÍTULO 6**

### **CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA OUTROS ESTUDOS**

#### **6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Dependendo do planejamento das operações de mina, especificamente do processo de beneficiamento do mineral que se procura obter, torna-se importante assegurar a eficiência no sistema de deposição dos rejeitos de mineração gerados, baseados em vários critérios recomendados, que são resumidos em um suficiente conhecimento do comportamento geotécnico do material e um correto dimensionamento com uma respectiva operação dos sistemas de disposição de rejeitos. A sedimentação, o adensamento e a compressibilidade são propriedades importantes quando se trata da disposição dos rejeitos finos. Como já explicado nos capítulos iniciais, um rejeito fino não pode ser considerado no princípio de Terzaghi. Por isso, uma técnica especial foi utilizada nesta pesquisa, a qual abrangeu as particularidades do comportamento relacionadas às grandes deformações experimentadas no decorrer do processo de adensamento, o que reproduz com melhor objetividade a otimização da deposição baseada na compressibilidade do material em estudo.

Esta tese envolveu vários aspectos importantes: aumentar o conhecimento sobre a utilização do melhor desempenho entre o coagulante e o floculante pela sua origem química para obtenção das condições mais favoráveis para o processo de sedimentação com o aumento da velocidade de sedimentação das partículas do material, reforçar estudos anteriores das propriedades do rejeito de fosfato oriundo do processo de beneficiamento da Mina de Bayovar, no Peru, aplicando as técnicas de ensaios de laboratório como o adensamento por percolação induzida para conhecer seu comportamento para diferentes teores de sólidos e com condições de diferentes concentrações de coagulantes e floculantes e suas análises representativas, quantitativas e comparativas, relacionadas aos resultados obtidos nos diversos programas experimentais realizados.

O estudo do comportamento deposicional destes rejeitos tem sido realizado sempre considerando a influência da salinidade na velocidade de sedimentação. Os resultados obtidos fornecem uma nova visão, contribuindo para uma melhor compreensão dos efeitos nos rejeitos em solução com alta salinidade e nas pesquisas futuras de outros coagulantes e floculantes.

## **6.2 CONCLUSÕES**

### **6.2.1 Influência da salinidade**

#### ***Influência da Salinidade durante os Ensaios de Coluna***

Os ensaios de coluna auxiliaram para ter uma noção do mecanismo de interação entre os coagulantes e floculante e as partículas finas em soluções de alta salinidade e o mecanismo de floculação associado, constatando a grande relevância prática e fundamental no processamento de disposição de rejeitos de mineração. O teor de sal demonstrou o controle na magnitude das forças repulsivas no rejeito, prevendo uma suspensão instável em uma solução de 4576 ppm que é um pouco mais do que 10% da água do mar. Ensaios em amostras dessalinizadas apresentaram um teor de salinidade de 2746 ppm e evidenciaram uma velocidade de sedimentação menor do que as amostras com teor de salinidade oriunda do processo de benefício do minério.

A salinidade da água do mar depende do teor do NaCl. Este sal possui uma atração intermolecular do tipo Ligação Iônica, que ao ser dissolvida em água (substância covalente polar), dissocia os componentes em  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$ , ocorrendo uma circundação entre as moléculas de água, procurando então cargas elétricas afins para estabilizar a solução. Como resultado, a influência da salinidade na velocidade de sedimentação das partículas naturais foi algumas vezes incerta. Uma solução salina pode reduzir significativamente a repulsão eletrostática que existe entre as partículas sólidas carregadas negativamente, levando a interações de ponte dos floculantes, sendo com mais eficácia no floculante orgânico, o que melhora a sedimentação de rejeitos de fosfato.

Sendo um ponto muito relevante o impacto do tipo de carga dos agentes químicos na



floculação de fosfato, o que foi investigado em detalhes, o sal de cloreto de sódio teve uma característica de melhorar as condições de floculação durante os ensaios. Este sal possui uma elevada capacidade osmótica, em consequência, uma pressão osmótica, antecipando a divisão da solução homogênea do rejeito em soluto (a polpa) e solvente (a água) na floculação e atuou como um agente distribuidor da solução, para dar como resultado dois componentes separados, um menos concentrado (ou solvente puro) e outro com solução mais concentrada. Portanto, a sedimentação dos rejeitos dependerá significativamente da salinidade da solução, tipo e dosagem dos floculantes.

### **6.2.2 Ensaio de sedimentação em coluna**

Dos mais de 150 ensaios de coluna realizados nesta tese, pode-se inferir que a sedimentação dos rejeitos de fosfato depende significativamente de três fatores: o teor de salinidade da solução, o tipo de agente químico e sua dosagem. Durante a sedimentação das partículas, pode-se concluir a presença de interações coagulante-partícula, floculante-partícula e partícula-partícula nos rejeitos, como repulsão eletrostática, atração das forças intermoleculares existentes conhecidas como Forças de Van der Waals e ponte de polímero. A força iônica das soluções pode afetar significativamente a interação eletrostática entre partículas e a conformação de floculantes poliméricos carregados. O aumento da salinidade da solução pode causar uma conformação molecular mais comprimida e reduzir drasticamente a repulsão eletrostática entre as partículas sólidas e polímeros carregados negativamente, o que melhora a sedimentação de rejeitos. Por outro lado, a força iônica da solução tem efeito desprezível na conformação molecular e adsorção, e a sedimentação de rejeitos é determinada principalmente pela competição entre a ponte de polímeros e a repulsão elétrica entre as partículas negativamente carregadas em água doce e por ponte de polímero em água salina.

### ***Efeito do sulfato de alumínio e sulfato ferroso nos estágios de sedimentação e adensamento***

Dentro dos estágios apresentados por Imai (1981), as curvas típicas do material de rejeito de fosfato apresentam de maneira muito marcante as três etapas presentes no processo de deposição e ocorrem seguindo uma sequência definida, sendo que a floculação tem uma

tendência linear devido ao processo químico em que partículas muito pequenas são agregadas, para formar logo os flóculos para que possam decantar-se iniciando o seguinte estágio. A sedimentação mostrou-se como um tipo de tendência exponencial, originando uma curva característica inicialmente com um pequeno aumento da velocidade para logo gradualmente diminuir. Já o adensamento apresentou-se de maneira exponencial e terminou de maneira linear, correspondente ao término da consolidação.

Depreende-se, como consequência, que os diferentes teores de sólidos ensaiados são inversamente proporcionais à definição dos estágios nas curvas, o que quer dizer que ao aumentar o teor de sólidos a curva típica do ensaio de sedimentação torna-se mais suavizada, perdendo a notoriedade marcada, especificamente no estágio de sedimentação, o qual é reduzido de modo evidente pela quantidade de sólidos presentes em uma solução salina de 4576 ppm.

O adensamento do rejeito é afetado, principalmente, pela perturbação durante a sedimentação ocasionada pelo coagulante, isto é, ao aumentar a velocidade de sedimentação, os sedimentos não conseguem atingir seu estado natural de adensamento, provocando que durante o processo de consolidação do rejeito não se consiga reduzir completamente o volume de água presente nos vazios do material. Portanto, o aumento da concentração do coagulante é inversamente proporcional ao adensamento do rejeito, atingindo uma taxa de até 4,5% de diferença com a consolidação em condições naturais.

Em todos os ensaios, o coagulante neutro obteve resultados inferiores na clarificação e na formação de floco se comparado com os ensaios em que foi aplicado o coagulante catiônico. As condições dos ensaios realizados com teores de sólidos de 8,5%, 11% e 13,5% foram uma temperatura em média de 22°C e com pH neutro com média de 7. O sulfato de alumínio mostrou-se mais bem-sucedido frente ao seu concorrente ferroso no processo de adesão das moléculas à superfície sólida presente no rejeito. Notadamente, o desempenho no estágio de sedimentação manifestou-se ótimo com uma velocidade de sedimentação maior comparada com as outras curvas nos ensaios de sedimentação desenvolvidos.

Como consequência das interações específicas de transferência de  $\text{SO}_4^{2-}$  como resultado de uma ligação iônica do fosfato a um pH variável por meio de flocos formados a partir

do sal de sulfato de alumínio, diminuindo o pH e a turbidez. O sal de alumínio é um alúmen, ao estar carregado positivamente consegue neutralizar mais rapidamente as cargas negativas do rejeito, pois ioniza com o íon (cátion de alumínio) formando os flocos rapidamente na sedimentação para os teores de sólidos estudados. Conseguiu atingir uma velocidade máxima de sedimentação de 0,40; 0,13 e 0,11 cm/min respectivamente.

Por outra parte o sal ferroso, um sal neutro, utilizado para contrastar os resultados com o alúmen só conseguiu chegar a velocidades bem por debaixo da taxa do alúmen e valores similares ao estado natural, acontecendo que o rejeito só atingiu uma velocidade de 0,17; 0,07 e 0,08 cm/min, revelando a efetividade do sulfato de alumínio na sedimentação.

#### ***Efeito do sulfato de alumínio e C-498 nos estágios de sedimentação e adensamento***

Foi avaliado o desempenho de um coagulante e um floculante catiônico. Utilizou-se um teor ótimo diferente dos agentes químicos para os teores de sólidos de 8,5%, 11%, 13,5%, 16%, 18,5%, e 21%, ensaiando sempre com um pH neutro e temperatura ambiente constante. De forma geral, para todos os casos, a taxa inicial de floculação e o crescimento dos flocos do rejeito de fosfato dependeram da dosagem do coagulante e do floculante e do tempo de floculação que, no caso do C-498, foi até 8 vezes mais efetivo do que o sulfato de alumínio, já comparado com o estado natural que foi de até 10 vezes (quando  $Sw=11\%$  e concentração 80 ppm).

De fato, na floculação sucede ao apresentar uma melhor carga catiônica dentre estes dois agentes formadores de flocos. O coagulante adsorve satisfatoriamente via interações eletrostáticas (cargas elétricas em estado de repouso) as cargas negativas da superfície das partículas da polpa do rejeito de fosfato. De outro lado, o floculante apresentou pontes de polímeros formando complexos intermoleculares de diferentes estequiometrias como o mecanismo dominante na floculação sedimentando rapidamente.

O sulfato de alumínio quando trabalhado com rejeitos de fosfato em condições de salinidade alta, apresenta um melhor desempenho com um teor de sólidos baixo, obtendo velocidades de sedimentação satisfatórias, nas quais o pico para uma velocidade aceitável é com um teor de sólidos de até 13,5%, sendo que com 16% o desempenho começa a decrescer até o teor de 21%. Devido às cadeias eletrolíticas catiônicas que podem

adsorver via interações eletrostáticas na superfície das partículas do rejeito de fosfato, que ao aumentar os sólidos, o sulfato de alumínio diminui consideravelmente a sua ação coagulante ao não conseguir as pontes entre as partículas. No entanto, o C-498, um floculante catiônico altamente eficiente, mostrou-se ser mais apropriado para o rejeito de fosfato ao mostrar um melhor desempenho nos diferentes estágios da sedimentação. Este floculante apresentou também uma relação concentração-teor de sólidos mais razoável, ao poder criar mais pontes entre as partículas, considerando que para um maior teor de sólidos a concentração deve incrementar-se. Porém, a velocidade de sedimentação é muito menor quando comparada com teores baixos.

Durante os estágios de sedimentação, o mecanismo de neutralização de carga e floculação para a formação de pontes, a propósito do uso de floculantes, teve um papel importante na formação e assentamento do floco. Quando são comparados os valores de velocidade de sedimentação nas três condições (sem uso de agentes formadores de flocos, com coagulante e com floculante), mostra-se com benefícios consideráveis o uso de floculantes para a otimização da velocidade de sedimentação, quando bem conhecida a concentração dele para cada teor de sólidos do rejeito de fosfato.

O estágio de adensamento foi afetado significativamente pelo aumento da velocidade de sedimentação para os 6 teores de sólidos, que foram ensaiados com as mesmas condições de salinidade de 4576 ppm, cuja concentração também exerce uma estimulação secundária para a sedimentação acontecer com maior velocidade. Ao criar um ambiente agitado, as partículas começam a adensar-se desordenadamente criando maiores índices de vazios ao atingir sua altura de sólidos.

#### ***Efeito do sulfato de alumínio nos estágios de sedimentação e adensamento para amostras alteradas em forno de laboratório e condições naturais***

Durante os testes de sedimentação conseguiu-se distinguir três estágios diferentes, que correspondem à floculação, sedimentação e adensamento, nos quais as velocidades para cada estágio foram relativamente constantes. Porém, achou-se picos no início do estágio de sedimentação, o que representaria uma aceleração intermediária, percebendo que no final dos estágios a velocidade vai diminuindo.

O modelo de Imai permite definir a existência de três estágios durante o processo de sedimentação e, conseqüentemente, caracterizar e classificar a magnitude da sedimentação do rejeito em um ensaio de sedimentação. Também permite estimar a concentração necessária para que o estágio de floculação consiga o ponto ótimo que, dependendo do teor de sólidos, poderá variar entre 60 e 80 ppm do sulfato de alumínio para ambas as condições, percebendo que melhora ainda mais no material seco, onde ocorre um aumento repentino da velocidade no estágio de sedimentação, não descrita anteriormente na literatura.

Dois motivos têm gerado uma melhor velocidade de sedimentação para o material seco em estufa, o primeiro é o aperfeiçoamento dos cristais do fosfato mediante a sua maturação, já que os fosfatos bem cristalizados têm uma estrutura mais estável. Por outro lado, a salinidade aumentou em aproximadamente uma ordem de 10 até 6% proporcionalmente ao aumento do teor de sólidos. Por consequência, favoreceu a sedimentação do rejeito de mineração com uma eficácia alta para esse tratamento.

Para as condições normais, os teores de sólidos de 8,5% a 21% no estágio de adensamento do rejeito foram afetados significativamente pela perturbação durante o estágio de sedimentação ocasionado pelo coagulante. Aqueles ensaios que atingiram os picos de velocidade máxima de sedimentação são proporcionalmente diretos ao aumento da altura final de adensamento com diferenças de até 1,5 cm, ocasionando que o processo de consolidação do rejeito não atinja integralmente o volume de água presente nos vazios do material que se desejava. Já para as condições em estufa, todos os teores não apresentaram uma notoriedade significativa, sendo três vezes menor a diferença em relação ao seu concorrente.

### **6.2.3 Ensaio de adensamento induzido por percolação – HCT**

#### ***Ensaio HCT sem aplicação de aditivos***

Seis ensaios de adensamento induzido por percolação foram realizados no Centro Tecnológico de Geotecnia Aplicada (CTGA), variando os teores de sólidos em relação de incremento de 2,5%, iniciando com 8,5% e terminado em 21%, para determinar com precisão as relações de compressibilidade e permeabilidade para os rejeitos de fosfato

com a característica de ser de baixa densidade. Os resultados obtidos estão de acordo com dados históricos publicados em pesquisas anteriores e isso torna confiável a metodologia aplicada e o aparelho HCT do laboratório do CTGA como uma ferramenta confiável para a caracterização do adensamento de rejeitos de baixa densidade.

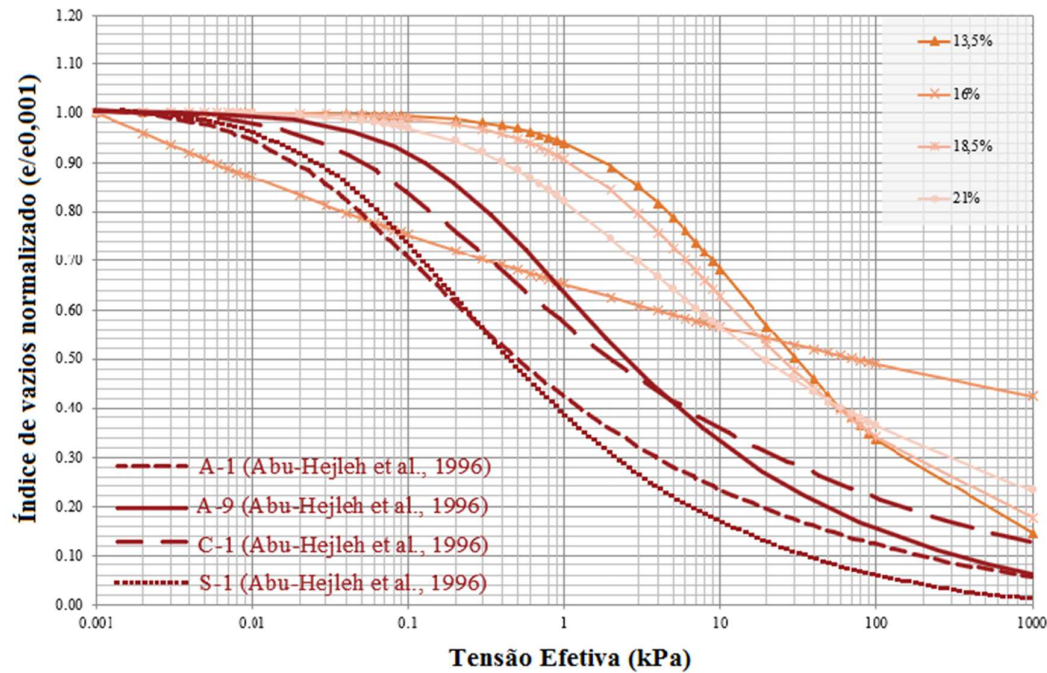


Figura 6.1 – Resultados dos ensaios HCT dos rejeitos estudados em estado natural confrontados com as argilas fosfáticas da Flórida (Abu-Hejleh *et al.*, 1996)

A correlação do índice de vazios-tensão efetiva e índice de vazios-permeabilidade oferecem um modelo de adensamento para o rejeito de fosfato que pode auxiliar os profissionais a apresentarem boas estimativas sobre o comportamento de adensamento das partículas finas do rejeito no campo.

#### ***Ensaios HCT com aplicação de aditivos***

Vinte ensaios de adensamento induzido por percolação foram realizados para os teores de sólidos avaliados. Primeiramente seis ensaios sem aditivos, depois seis com coagulante e seis com floculante (neste caso foram selecionados aqueles teores que apresentaram melhores resultados com a dosagem correta de aditivo que auxiliava a obter uma velocidade de sedimentação ótima). Finalmente, dois ensaios com amostras dessalinizadas cujos teores e dosagens foram selecionados dos melhores desempenhos. Isso objetivou determinar com precisão as relações de compressibilidade e

permeabilidade para os rejeitos de fosfato com a característica de ser de baixa densidade e o seu alto teor de salinidade mesmo quando passado pelo processo de osmose inversa.

Os resultados mostraram-se bastante representativos visto que os valores se mantiveram em uma faixa com limites próximos. Porém, percebeu-se que o uso de coagulantes e floculantes aumentaram os valores do índice de vazio significativamente, isto pelo comportamento dos flocos ao sedimentar com uma velocidade maior do que quando não é utilizado nenhum aditivo. Do mesmo jeito, os valores da condutividade hidráulica diminuem, ou seja, a permeabilidade baixa significativamente, isto devido ao fato que, durante a etapa de carregamento, os grãos do rejeito acomodam-se rapidamente.

Para ambos os casos, quando utilizado o coagulante ou o floculante com teores de sólidos altos (16%, 18,5% e 21%), as curvas para as relações de índices de vazios e para as de condutividade hidráulica ficaram muito mais próximas entre elas do que quando não foi utilizado nenhum aditivo. Já para teores baixos (8,5%, 11% e 13,5%), as curvas ficaram um pouco mais afastadas entre elas e demoraram a se estabilizar, isto por causa da pouca quantidade de sólidos presentes no ensaio, o que provoca um comportamento diferenciado entre as curvas.

### ***Ensaio HCT com amostras dessalinizadas***

Objetivando verificar a ação da salinidade no processo de adensamento, foram realizados dois ensaios com amostras dessalinizadas. Um corpo de prova com um teor de sólidos de 16% e uma dosagem de coagulante 60 ppm. Um segundo corpo de prova com o mesmo teor de sólidos, mas com 80 ppm de floculante. Estas dosagens que foram obtidas dos mais de 150 ensaios de sedimentação se mostraram ótimas. Durante os ensaios de coluna foi evidenciado que as amostras dessalinizadas tinham um comportamento de aumentar o índice de vazios ao final dos estágios da sedimentação. Com isso ficou claro a ação da salinidade sobre o processo de floculação e na deposição final do rejeito.

Verificou-se que o processo de dessalinização em laboratório não auxiliou a otimização do adensamento e compressibilidade do material. O rejeito mostrou-se menos compressível devido diretamente pela diminuição do cloreto de sódio. Já ao interagir com o coagulante e com o floculante, houve uma melhora nos processos de formação de flocos.

#### **6.2.4 Simulações de enchimento**

Quatro simulações foram realizadas para serem comparadas mediante o uso de uma análise computacional pelo CONDES0. Percebeu-se uma conformidade entre os valores obtidos e as curvas realizadas na simulação realizada no Tanque TK-105 (altura versus índice de vazios, altura versus teor de sólidos e cota versus poropressão), percebendo uma ligeira elevação por causa dos valores dos índices de vazios das curvas quando dessalinizadas.

Assim, as curvas de enchimento baseadas nos parâmetros construtivos reforçaram a potencialidade para prever a capacidade de armazenagem na deposição final de próximos reservatórios, mas observado, com prudência, o comportamento desses rejeitos de baixa densidade. Estas análises possuem mais benefícios do que outras técnicas como os ensaios próprios em campo, que podem se tornar perigosos na hora da aquisição dos dados. Por isso, a efetividade desta metodologia padronizada para análise do comportamento de rejeitos de fosfato torna-se importante.

### **6.3 SUGESTÕES PARA OUTROS ESTUDOS**

Como sugestões complementares a este estudo citam-se as seguintes proposições:

- Aplicar a padronização da metodologia e das observações realizadas ao rejeito de fosfato para outros tipos de rejeitos.
- Avaliar outros tipos de coagulantes e floculantes ao rejeito para continuar avaliando o seu comportamento, procurando a otimização do processo de disposição final.
- Avaliar o uso combinado de coagulante-floculante no processo de sedimentação para estudar.
- Avaliar o uso de co-disposição destes rejeitos com estéril de mineração como disposição final no plano de fechamento de mina.
- Avaliar a influência da salinidade em outras propriedades como a abrasividade nos tanques como método de disposição final. Aplicação de materiais químicos resistentes à corrosão podem influenciar também o processo de adensamento.



## REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS; **NBR 10004: Resíduos sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro. 71 p., 2004.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS; **NBR 13028: Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos. contenção de sedimentos e reservação de água - Requisitos**. Rio de Janeiro. 16 p., 2017.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS; **NBR 6457: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro. 8 p., 2016.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS; **NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro. 5 p., 2017a.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS; **NBR 6502: Rochas e Solos**. Rio de Janeiro. 18 p., 1995.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS; **NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro. 3 p., 2016.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS; **NBR 7181: Solo – Análise granulométrica**. Rio de Janeiro. 12 p., 2018.
- ABU-HEJLEH. A. N.; **Desiccation theory for soft soils**. Boulder. Colorado: Department of Civil. Environmental and Architectural Engineering. University of Colorado. (Ph.D. Thesis). 206 p., 1993.
- ABU-HEJLEH. A. N.; ZNIDARCIC. D.; **Desiccation theory for soft cohesive soils**. Journal of Geotechnical Engineering. ASCE. v.121. n. 6. pp. 493-502, 1995.
- ABU-HEJLEH. A. N.; ZNIDARCIC. D.; **User manual for computer program SICTA**. Department of Civil. Environmental and Architectural Engineering. University of Colorado. Boulder. Colorado. 101 p., 1992.
- ABU-HEJLEH. A. N.; ZNIDARCIC. D.; BARNES. B. L.; **Consolidation characteristics of phosphatic clays**. Journal of Geotechnical Engineering. ASCE. v. 122. n. 4. pp. 295-301, 1996.
- AGAPITO L. A.; BAREITHER. C. A.; **Application of a one-dimensional large-strain consolidation model to a full-scale tailings storage facility**. Minerals Engineering. Volume 119. pp. 38-48, 2018.

- ALLERSMA. E.; HOEKSTRA. A. J.; BIJKER. E. W.; **Transport Patterns in the Chao Phya Estuary**. Delft Hydraulics Laboratory. Publication No. 47. pp. 63–79, 1966.
- ALSAFASFEH, A.; ALAGHA, L. **Recovery of Phosphate Minerals from Plant Tailings Using Direct Froth Flotation**. Minerals, 7, p. 145. 2017.
- ARTHUR. M.A.; DEAN. W.E.; **Oceanographic Controls on Sedimentary and Geochemical Facies on the Peru Outer Shelf and Upper Slope**. Open-File Report 2013-1105. U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/ofr20131105>. 44 p., 2013.
- ASADI. T.; AZIZI. A.; LEE. J.; JAHANI. M.; **Leaching of zinc from a lead-zinc flotation tailing sample using ferric sulphate and sulfuric acid media**. Journal of Environmental Chemical Engineering. Volume 5. Issue 5. pp. 4769-4775, 2017.
- ASENSI. E.; ALEMANY. E.; SECO. A.; FERRERA. J.; **Characterization of activated sludge settling properties with a sludge collapse-acceleration stage**. Separation and Purification Technology. Volume 209. 31. pp. 32-41, 2019.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS; **D-854: Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer**. West Conshohocken. PA. 8 p., 2014.
- ATKINS. P.; JONES. L.; LAVERMAN. L.; **Chemical Principles**. W. H. Freeman. Edition: Sixth. 1120 p., 2012.
- BAKER. K.B.; BURNETT W. C.; **Distribution. texture and composition of modern phosphate pellets in Peru shelf muds**. Marine Geology 80 (3-4). pp. 195-213, 1988.
- BALDONIO, R. D. O.; **Concentração do fosfato de Bayovar: aspectos fundamentais e tecnológicos; tese de doutorado**. Escola Politecnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petroleo. São Paulo. Brasil. 110 p. 2017.
- BECH J.; SUAREZ M.; REVERTER F.; TUME P.; SÁNCHEZ P.; BECH J.; LANSAC A.; **Selenium and other trace elements in phosphate rock of Bayovar–Sechura (Peru)**. Journal of Geochemical Exploration 107: pp. 136–145, 2010.
- BEEN. K.; SILLS. G. C.; **Self-weight consolidation of soft soils: an experimental and theoretical study**. Géotechnique. v. 31. n. 4. ISSN 0016-8505. E-ISSN 1751-7656. pp. 519-535, 1981.
- BOHUSLAV DOBIAS. H.S.; **Coagulation and Flocculation**. (2nd ed.). CRC Press. Taylor & Francis Group. United States of America. 882 p., 2005.

BOISVERT. J.; CONG TO. T.; BERRAK. A.; JOLICOEUR. C.; **Phosphate adsorption in flocculation processes of aluminium sulphate and poly-aluminium-silicate-sulphate**. Water Research. Volume 31. Issue 8. pp. 1939-1946, 1997.

BRATBY. J.; **Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment**. (2nd ed.). IWA Publishing. London. 450 p., 2006.

BSI - BRITISH STANDARDS INSTITUTION; **BS 1377: Methods of test for soils for civil engineering purposes**. London. UK, 1975.

BULUSHU K. R.; KULKARNI D. N.; PATHAK B. N.; LUTADE S. L.; **Removal of ortho and condensed phosphates by clay and aluminum sulphate from clear and turbid waters using Jar test**. Indian J. Environ. Health. 21. pp. 143-161, 1979.

BURNETT W. C.; VEEH H. H.; **Uranium-series disequilibrium studies in phosphorite nodules from the west coast of South America**. Geochimica et Cosmochimica Acta Volume 41. Issue 6. pp. 755-757. 759-764. DOI: 10.1016/0016-7037(77)90046-1, 1977.

BURNETT W.C.; KIM K.H.; **Comparison of radiocarbon and uranium-series dating methods as applied to marine apatite**. Quat. Res., 25 pp. 369-379, 1986.

BURNETT. W. C.; **Geochemistry and origin of phosphorite deposits from Peru and Chile**. Geol. Soc. America Bull., v. 88. 9 figs., DOI: 10.1130/0016-7606(1977)88<813: GAOOPD>2.0.CO;2. pp. 813-823, 1977.

BURNETT. W.C.; VEEH H.H.; SOUTAR A.; **U-series oceanographic and sedimentary evidence in support of recent formation of phosphate nodules off Peru**. Soc. Econ. Paleontol. Mineral. Spec. Publ., 29. pp. 61-72, 1980.

BURNETT. W.C.; BAKER. B.; CHIN. P.; MCCABE W.; DITCHBURN R.; **Uranium-series and AMS <sup>14</sup>C studies of modern phosphatic pellets from Peru shelf muds**. Marine Geology. 80. pp. 215-230, 1988.

BURT. T. N.; **Field settling velocities of estuary muds**. In: Mehta. A. J. (ed.). Estuarine Cohesive Sediment Dynamics. Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies. 14. Berlin. Germany: Springer Verlag. pp. 126-150, 1986.

BUSCH, R. G.; **Construção de Barragens com Rejeitos de Fosfato. Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração (REGEO 87)**, Rio de Janeiro, v. 1, p. 379-396, 1987.

BUSSIÈRE. B.; **Colloquium 2004: Hydrogeotechnical properties of hard rock tailings from metal mines and emerging geoenvironmental disposal approaches**. Can. Geotech. J., 44 (9). pp. 7-40.1019-1052, 2007.

CABEZAS J. O.; **Explotación de los yacimientos de fosfatos en Bayóvar**. Perfiles de Ingeniería. pp. 85-93, 2016.

CANÇADO. N. L.; **Desenvolvimento de equipamento para execução de ensaios HCT com uso de bomba de fluxo**; dissertação de mestrado. Núcleo de Geotecnia - Universidade Federal de Ouro Preto. Brasil. 113 p., 2010.

CHEN. L.; ZHU. H.; SUN. Y.; CHIANG. P.; SUN. W.; XU. Y.; ZHENG. H.; KINJAL. J. S.; **Characterization and sludge dewatering performance evaluation of the photo-initiated cationic flocculant PDD**. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. Volume 93. pp. 253-262, 2018.

CHENEY. T. M.; MCCLELLAN. G. H.; MONTGOMERY. E.S.; **Sechura phosphate deposits. their stratigraphy. origin. and composition**. Economic Geology Vol. 74. DOI: 10.2113/gsecongeo.74.2.232. pp. 232-259, 1979.

CMMM - COMPANHIA MINEIRA MISKI MAYO; **Relatórios. projetos e documentos diversos**, 2017.

COLIC. M.; GOTOVAC. D.; LECHTER. A.; **Flocculation-Flotation vs. MBR for High MLSS Secondary Clarification**. Clean Water Technology Inc., Los Angeles. CA. p. 13, 2011.

COOKE. G. D.; WELCH. E. B.; PETERSON. S. A.; NICHOLS. S. A.; **Restoration and Management of Lakes and Reservoirs**. CRC Press. Boca Raton. 616 p., 2005.

COOKE. J. A.; JOHNSON. M. S.; **Ecological restoration of land with particular reference to the mining of metals and industrial minerals: a review of theory and practice**. Environ. Rev., 10. pp. 41-71, 2002.

CRINI G.; BADOT. P.-M.; **Application of chitosan. a natural aminopolysaccharide. for dye removal from aqueous solutions by adsorption processes using batch studies: a review of recent literature**. Prog. Polym. Sci., 33. pp. 399-447, 2008.

DAO. V.H.; CAMERON. N. R.; SAITO. K.; **Synthesis. properties and performance of organic polymers employed in flocculation applications**. Polym. Chem., 7. pp. 11-25, 2016.

DIA. M.; ZENTAR. R.; ABRIAK. N.; NZIHOUE. A.; DEPELSENAIRE. G.; GERMEAU. A.; **Effect of phosphatation and calcination on the environmental behaviour of sediments**. International Journal of Sediment Research. Volume 34. Issue 5. pp. 486-495, 2019.

DIVAKARAN R.; SIVASANKARA PILLAI. V. N.; **Flocculation of kaolinite suspensions in water by chitosan**. Water Res., 35. pp. 3904-3908, 2001.

DOLEJS P.; **Treatment of low alkalinity humic waters with partially neutralized aluminum sulphate.** Environ. Technol. Lett., Volume 10. pp. 41-48, 1989.

EDZWALD J. K.; UPCHURCH J. B.; O'MELIA C. R.; **Coagulation in estuaries.** Environmental Science and Technology 8: pp. 58-63, 1974.

EKAMA. G. A.; BARNARD. J. L.; GUNTHER. F. W.; KREBS. P.; MCCORQUODALE. J.A.; PARKER. D.S.; **Secondary Settling Tanks: Theory. Modelling. Design and Operation.** International Association on Water Quality. 236 p., 1997.

EL-SHALL. H.; BOGAN. M.; **Mathematical modeling of settling of solid suspensions.** Florida Institute of Phosphate Research. Bartow. Florida. University of Florida, 1992.

EL-SHALL. H.; SHARMA. R.; ABDEL-KHALEK. N. A.; SVORONOS. S.; GUPTA. S.; **Column flotation of Florida phosphate: an optimization study.** Minerals and Metallurgical Processing. 18 (3). pp. 142-146, 2001.

FALCUCCI. A.; **A influência de floculantes poliméricos na formação de pastas minerais.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, 2007.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations; **Use of Phosphate Rocks for Sustainable Agriculture.** Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin 13. Rome. <http://www.fao.org/docrep/007/y5053e/y5053e00.htm#Contents>. ISSN 0532-0488. ISBN 92-5-105030-9. 2004. Acessado em: 04/12/2018.

FASSBENDER. H.W.; **Los fosfatos naturales de Sechura. Perú.** Turrialba. 17 (2): pp. 159-164, 1967.

FOCUS VENTURES; **The Bayóvar 12 Phosphate Project Northern Peru.** Presentation. Disponível em: < [http://www.enernews.com/media/briefs/focus-ventures--bayovar-12-proyecto-de-fosfato-norte-de-peru\\_1152.pdf](http://www.enernews.com/media/briefs/focus-ventures--bayovar-12-proyecto-de-fosfato-norte-de-peru_1152.pdf)>. 2015. Acessado em: 03/12/2018.

FOGWILL. G.; **Recent advances in paste thickening implemented in Ekapa Mining.** GL&V South Africa – Internal Report. 2005.

FOLK. R. L.; **Practical petrographic classification of limestones.** American Association of Petroleum Geologists Bulletin. 43. pp. 1-38, 1959.

FRESNO. T.; MORENO-JIMÉNEZ E.; PEÑALOSA. J. M.; **Assessing the combination of iron sulfate and organic materials as amendment for an arsenic and copper contaminated soil. A chemical and ecotoxicological approach.** Chemosphere. Volume 165. pp. 539-546, 2016.

FROELICH P.N.; ARTHUR M.A.; BURNETT W.C.; DEAKIN M.; HENSLEY V.; JAHNKE R.; **Early diagenesis of organic matter in Peru continental margin sediments: phosphorite precipitation.** Marine Geology 80 (3-4). [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(88\)90095-3](https://doi.org/10.1016/0025-3227(88)90095-3), pp. 309-343, 1988.

FU. F. L.; WANG. Q.; **Removal of heavy metal ions from wastewaters: a review.** Journal of Environmental Management. 92. pp. 407-418, 2011.

FUAD. N.; OMAR. R.; KAMARUDIN S.; HARUN R.; IDRIS. A.; AZLIN WAN A.K.G.; **Effective use of tannin based natural biopolymer. AFlok-BP-1 to harvest marine microalgae Nannochloropsis sp.** JECE. 6 (4). pp. 4318-4328, 2018.

GARCIA. M. H.; **Sedimentation Engineering: Processes. Measurements. Modeling and Practice.** Sediment Transport and Morphodynamics. In: GARCIA. M. H. (Ed.). Reston: ASCE. cap. 2. pp. 21-163, 2008.

GIBSON. R. E.; SCHIFFMAN R.L.; **A theory of consolidation of soft sediment.** National Bureau of Standards Microcopy Resolution Test chart. 36 p., 1985.

GIBSON. R. E.; ENGLAND. G. L.; HUSSEY. M. H. L.; **The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays. I. Finite nonlinear consolidation of thin homogeneous layers.** Geotechnique. 17(3). pp. 261-273, 1967.

GIBSON. R. E.; ENGLAND. G. L.; HUSSEY. M. J. L.; **The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays: I. Finite non-linear consolidation of thin homogeneous layers.** Géotechnique. v. 17. n. 3. pp. 261-273, 1967.

GIBSON. R. E.; SCHIFFMAN. R. L.; CARGILL. K. W.; **The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays. II. Finite nonlinear consolidation of thick homogeneous layers.** Can. Geotech. J.. 18 (2). pp. 280-293, 1981.

GOLDER ASSOCIATES PERÚ S.A.; **Estudio de Impacto Ambiental - Proyecto de Fosfatos Bayóvar. Piura. Perú.** Resumen ejecutivo. Lima, 2007.

GOMES, M. F.; **Metodologia de análise hierárquica aplicada para escolha do sistema de disposição de subproduto da mineração com ênfase nos rejeitos de minério de ferro.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 46 p. 2009.

GORAKHKI. M. H.; BAREITHER. C.A.; **Salinity effects on sedimentation behavior of kaolin, bentonite, and soda ash mine tailings.** Applied Clay Science. Volume 114. p. 593-602, 2015.

GRAHAM. G. W.; MANNING. A. J.; **Floc size and settling velocity within a *Spartina anglica* canopy.** Cont. Shelf Res. 27(8): pp. 1060-1079, 2007.

GRAHAM. G.W.; NIMMO SMITH. W.A.M.; **The application of holography to the analysis of size and settling velocity of suspended cohesive sediments.** Limnology and Oceanography: Methods 8. pp. 1-15, 2010.

GRATIOT. N.; MANNING A.; **An experimental investigation of floc characteristics in a diffusive turbulent flow.** In Ciavola. P., and M.B. Collins [eds.]. Sediment transport in European estuaries. J. Coast. Res. Special Issue 41: pp. 105-113, 2004.

GREGORY. J.; **Approximate expressions for retarded van der Waals interaction.** J. Colloid Interface Sci., 83. pp. 138-145, 1981.

GREGORY. J.; **Rates of flocculation of latex particles by cationic polymers.** J. Colloid Interface Sci., 42. pp. 448-456, 1973.

GRUBER. G. A.; **Anionic conditioning for phosphate flotation Beneficiation of Phosphate: Advances in Research and Practice.** Society of Mining, Metallurgy and Exploration. Littleton, 1999.

GU. Z.; GAO. Z.; ZHENG. S.; **Beneficiation of Florida dolomitic phosphate pebble with a fine-particle flotation process Beneficiation of Phosphate: Advances in Research and Practice.** Society of Mining, Metallurgy and Exploration. Littleton, 1999.

GUIMARÃES. F. A. V.; **Revisão nos métodos de dimensionamento de espessadores e comparação dos modelos industriais;** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, 2010.

HANNA. H.S.; **The role of cationic surfactants in the selective flotation of phosphate ore constituents.** Powder Technol., 12. pp. 57-64, 1975.

HEA. W.; XIEA. Z.; LUA. W.; HUANBG. M.; MAA. J.; **Comparative analysis on floc growth behaviors during ballasted flocculation by using aluminum sulphate (AS) and polyaluminum chloride (PACl) as coagulants.** Separation and Purification Technology. Volume 213. 15. pp. 176-185, 2019.

HERNAINZ. F.; CALERO. M.; BLAZQUEZ G.; **Flotation of low-grade phosphate ore.** Advanced Powder Technology. 15 (4). pp. 421-433, 2004.

HU. X.; OOMMEN. T.; LU. Z.; WANG. T.; KIM. J.; **Consolidation settlement of Salt Lake County tailings impoundment revealed by time-series InSAR observations from multiple radar satellites.** Remote Sensing of Environment. Volume 202. 1. pp. 199-209, 2017.

HUANGA. Z.; CHENGA. C.; LIUA. Z.; ZENGA. H.; FENGA. B.; ZHONGB. H.; LUOA. W.; HUA. Y.; GUOA. Z.; HEA. G.; FU. W.; **Utilization of a new Gemini surfactant as the collector for the reverse froth flotation of phosphate ore in**

**sustainable production of phosphate fertilizer.** Journal of Cleaner Production. Volume 221. pp. 108-112, 2019.

HUERTA. A.; KRIEGSMANN. G. A.; KRIZEK. R. J.; **Permeability and compressibility of slurries from seepage-induced consolidation.** J. Geotech. Engrg., ASCE. 114(5). pp. 614-627, 1988.

IMAI. G.; **Development of a new consolidation test procedure using seepage force.** Soil and Foundations. v. 19. n. 3. pp. 45-60, 1979.

IMAI. G.; **Experimental studies on sedimentation mechanism and sediment formation of clay minerals.** Soil and Foundations. v. 21. n. 1. pp. 7-20, 1981.

JL. Y.; LU. Q.; LIU. Q.; ZENG H.; **Effect of solution salinity on settling of mineral tailings by polymer flocculants.** Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. Volume 430. 5. pp. 29-38, 2013.

JIANG. J. Q.; **The role of coagulation in water treatment.** Current Opinion in Chemical Engineering. Nanotechnology. Separation engineering. 8: pp. 36–44, 2015.

KADOOKA. H.; KISO. Y.; GOTO. S.; TANAKA. T.; JAMI. M. S.; IWATA. M.; **Flocculation behavior of colloidal suspension by use of inorganic and polymer flocculants in powder form.** Journal of Water Process Engineering. Volume 18. pp. 169-175, 2017.

KAWAMURA. S.; **Considerations on improving flocculation.** J. Am. Water Works Assoc. 68 (6). pp. 328–336, 1976.

KREKELER. M.P.S.; MORTON. J.; LEPP, J. et al.; **Mineralogical and geochemical investigation of clay-rich mine tailings from a closed phosphate mine, Bartow Florida, USA.** Environ Geol 55, pp. 123–147, 2008.

KEMIRA; **Technical Data Sheet – Superfloc C-490.** Ref. PS-D0047-EN. 2 p, 2015.

KOOHESTANIAN. A.; HOSSEINI. M.; ABBASIAN. Z.; **The Separation Method for Removing of Colloidal Particles from Raw Water.** American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci. 4 (2): 266–273. ISSN 1818-6769. 267 p., 2008.

KOTYLAR. L.S.; SPARKS. B.D.; SCHUTFE. R.; **Effect of salt on the flocculation behavior of nano particles in oil sand tailings.** Clay Clay Miner., 44 (1) pp. 121-131, 1996.

KRANENBURG. C.; **The fractal structure of cohesive sediment aggregates.** Estuarine. Coastal and Shelf Science 39: pp. 451-460, 1994.



KRONE. R. B.; **Flume Studies of the Transport of Sediment in Estuarial Shoaling Processes**. University of California. Hyd. Eng. Lab. and Sanit. Eng. Res. Lab., Berkeley. California, 1962.

KUMAR. K.; ADHIKARY. P.; KARMAKAR. N. C.; GUPTA. S.; SINGH. R. P.; KRISHNAMOORTHY S.; **Synthesis, characterization and application of novel cationic and amphoteric flocculants based on amylopectin**. Carbohydr Polym. 127. pp. 275-281, 2015.

KYNCH. G. J.; **A Theory of Sedimentation**. Trans. Faraday Society. 48. London. p. 166-177, 1952.

LEE. C.S.; ROBINSON. J.; CHONG. M.F.; **A review on application of flocculants in wastewater treatment**. Process Safe. Environ. Prot., 92. pp. 489-508, 2014.

LI. F.; JI. G.; XUE G.; **The preparation of inorganic coagulant polyferric sulphate [J]**. Tech and Biotech. 123 (9). pp. 859-864, 1997.

LIAOAB. Q.; TUA. G.; YANGAB. Z.; WANGABC. H.; HEA. L.; TANGA. J.; YANG. W.; **Simultaneous adsorption of As(III), Cd(II) and Pb(II) by hybrid bio-nanocomposites of nano hydroxy ferric phosphate and hydroxy ferric sulfate particles coating on Aspergillus niger**. Chemosphere. volume 223. pp. 551-559, 2019.

LIBÂNIO. M.; **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. Campinas: Átomo. 444 p., 2005.

LIBÂNIO. M.; **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. Editora Átomo. 3<sup>a</sup> ed.. Campinas / SP. 496 p., 2010.

LIU. C.; HONG. B.; XU. K.; ZHANG. M.; AN. H.; TAN. Y.; WANG. P.; **Synthesis and application of salt tolerance amphoteric hydrophobic associative flocculants**. Polym Bull. 71 (12). pp. 3051-3065, 2014.

LIU. J. C.; ZNIDARCIC. D.; **Modeling one-dimensional compression characteristics of soils**. Journal of Geotechnical Engineering. ASCE. v. 117. n. 1. pp. 162-169, 1991.

LIU. J.C.; **Determination of soil characteristics**. Phd. Thesis. Department of Civil. Environmental and Architectural Engineering. University of Colorado. 297 p., 1990.

LOTTERMOSER. B.G.; **Recycling, reuse and rehabilitation of mine wastes Elements**. 7. DOI: 10.2113/gselements.7.6.405. pp. 405-410, 2011.

LUMLEY. J. L.; **Eulerian and Lagrangian descriptions in Fluid Mechanics**. Film Notes. National Committee for Fluid Mechanics Films. Pennsylvania State University. No 21621. Encyclopedia Britannica Educational Corporation. 8 p., 1969.

LUTTRELL. W. E.; **Aluminum Sulfate**. Journal of Chemical Health and Safety. Volume 22. Issue 6. pp. 33-35, 2015.

MAGGI. F.; **Flocculation Dynamics of Cohesive Sediment**. Delft. The Netherlands: Delft University of Technology Ph.D. thesis. 154 p., 2005.

MALVERN; **Brouchure Mastersizer 2000**. Integrated systems for particle sizing. United Kingdom. 12 p., 2005.

MANHEIM. F.; ROWE. G. T.; JIPA. D.; **Marine phosphorite formation off Peru**. Jour. Sed. Petrology. v. 45. pp. 243-251, 1975.

MANNING. A. J.; FRIEND P.L.; PROWSE N.; AMOS C. L.; **Estuarine mud flocculation properties determined using an annular mini-flume and the labsfloc system**. Cont. Shelf Res. 27(8): pp. 1080-1095, 2007.

MARTÍNEZ-HUITLE, C. A.; RODRIGO, M. A; SCIALDONE O.; **Electrochemical Water and Wastewater Treatment**, 1st Edition, Butterworth-Heinemann, ISBN: 9780128131619, 556 p., 2018.

MCCONNELL. D.; **A structural investigation of the isomorphism of the apatite**. Group American Mineral. 54: pp. 1379-1391. 3, 1938.

MCDONALD. G. H.; **Miocene of the Sechura Desert. Piura**. Bol. Soc. Geol. del Perú. 30: pp. 225-242, 1956.

MEHTA. A. J.; **Estuarine Cohesive Sediment Dynamics: Proceedings of a Workshop on Cohesive Sediment Dynamics with Special Reference to Physical Processes in Estuaries**. Springer Publishing. 482 p., 1986.

MIGNIOT. C.; **Étude des propriétés physiques de différents sédiments très fins et de leur comportement sous des actions hydrodynamiques**. La Houille Blanche. 7. pp. 591-620, 1968.

MIKASA. M.; **The consolidation of soft clay: A new consolidation theory and application**. Tokyo: Kajima Institution Publishing, 1963.

MONTE. J. L.; e KRIZEK. R. J.; **One-dimensional mathematical model for large-strain consolidation**. Geotechnique. 26 (3). pp. 495-510, 1976.

MOODY. G. M.; **Polymeric flocculants**. P. Williams (Ed.). Handbook of Industrial Water-Soluble Polymers. Wiley-Blackwell. New York. pp. 134-173, 2007.

MORENO. P. A.; ARAL. H.; CUEVAS. J.; MONARDES. A.; ADARO. M.; NORGATE. T.; BRUCKARD. W.; **The use of seawater as process water at Las Luces copper-molybdenum beneficiation plant in Taltal (Chile).** Miner. Eng., 24. pp. 852-858, 2011.

NASIHA. H. J.; SHANMUGAM. P.; **Estimation of settling velocity of sediment particles in estuarine and coastal waters.** Estuarine. Coastal and Shelf Science 203: p. 59 e 71, 2018.

NASSER. M. S.; JAMES. A. E.; **The effect of polyacrylamide charge density and molecular weight on the flocculation and sedimentation behaviour of kaolinite suspensions.** Sep. Purif. Technol., 52. pp. 241-252, 2006.

OLADOJA. N. A.; **Advances in the quest for substitute for synthetic organic polyelectrolytes as coagulant aid in water and wastewater treatment operations.** Sustainable Chemistry and Pharmacy. 3: pp. 47–58, 2016.

O'MELIA. C. R.; BECKER. W. C.; AU. K. K.; **Removal of humic substances by coagulation.** Wat. Sci. Technol., 40 (9) pp. 47-54, 1999.

O'MELIA. C.R.; **Coagulation and flocculation.** W.J. Weber (Ed.). In Physicochemical Process for Water Quality Control. Wiley Interscience. New York. pp. 61-109, 1972.

PALACIOS. M.; **Geología de los cuadrángulos de Paita. Piura. Talara. Sullana. Lobitos. Quebrada Seca. Zorritos. Tumbes y Zarumilla.** Boletía N° 54 Serie A: Carta Geol. Nac. INGEMMET, 1994.

PANDEY. A.; PATHAK. V.V.; KOTHARI. R.; BLACK. P.N.; TYAGI. V.V.; **Experimental studies on zeta potential of flocculants for harvesting of algae.** Journal of Environmental Management. Vol 231. pp. 562-569, 2019.

PEREIRA. E.L.; **Estudo das características de compressibilidade e adensamento de rejeitos de fosfato de baixa densidade com o uso de técnicas experimentais de laboratório e de campo;** tese de doutorado. Núcleo de Geotecnia - Universidade Federal de Ouro Preto. Brasil. 254 p., 2017.

PORTELA. L.I.; RAMOS. S.; TRIGO-TEIXEIRA. A.; **Effect of salinity on the settling velocity of fine sediments of a harbour basin.** In: Conley. D.C., Masselink. G., Russell. P.E. and O'Hare. T.J. (eds.). Proceedings 12th International Coastal Symposium (Plymouth. England). Journal of Coastal Research. Special Issue No. 65. pp. 1188-1193. ISSN 0749-0208, 2013.

PROSKIN. S.; SEGO. D.; ALOSTAZ. M.; **Freeze–thaw and consolidation tests on Suncor mature fine tailings (MFT).** Cold Regions Science and Technology. Volume 63. Issue 3. pp. 110-120, 2010.

QI. C.; FOURIE. A.; CHEN. Q.; TANG. X.; ZHANG. Q.; Gao. Rugao; **Data-driven modelling of the flocculation process on mineral processing tailings treatment.** Journal of Cleaner Production. Volume 196. 20. pp. 505-516, 2018.

CHEN Q.; ZHANG Q.; FOURIE A.; XIN C.; **Utilization of phosphogypsum and phosphate tailings for cemented paste backfill.** Journal of Environmental Management, Volume 201, pp. 19-27, 2017.

QUINN. J.J.; KRACHT. W.; GOMEZ. C.O.; GAGNON. C.; FINCH. J.A.; **Comparing the effect of salts and frother (MIBC) on gas dispersion and froth properties.** Miner. Eng.. 20. pp. 1296-1302, 2007.

RADOIU. M.T.; MARTIN. D.I.; CALINESCU. I.; IOVU. H.; **Preparation of polyelectrolytes for wastewater treatment.** J. Hazard. Mater., 106. pp. 27-37, 2004.

RAMAROSON. J.; DIA. M.; DIRION J.-L.; NZIHOU. A.; DEPELSENAIRE G.; **Thermal treatment of dredged sediment in a rotary kiln: Investigation of structural changes;** Industrial Engineering Chemistry Research. 51 (21) pp. 7146-7152, 2012.

RAMAROSON. J.; DIRION. J.-L.; NZIHOU. A.; DEPELSENAIRE. G.; **Characterization and kinetics of surface area reduction during the calcination of dredged sediments.** Powder Technology. 190 (1–2) pp. 59-64, 2009.

RAMOS. S. S. S. C.; **Efeito da salinidade sobre a velocidade de queda de sedimentos finos de uma bacia portuária.** Caso de estudo: Marina do Parque das Nações. 2013. Dissertação (Mestrado) – Instituto Superior Técnico. Lisboa. 57 p., 2013.

REYES. R. L.; CALDAS. V. J.; **Geología de los cuadrángulos de Las Playas. La Tina. Las Lomas. Ayabaca. San Antonio. Chulucanas. Morropón. Huancabamba. Olmos y Pomahuaca.** Boletín N°39 Serie A: Carta Geol. Nac. – INGEMMET, 1987.

RODRÍGUEZ. I.; VILLARREAL. E.; ACOSTA. J.; **Metalogenia y Geología Económica por Regiones.** Instituto Geológico Minero y Metalúrgico; Dirección de recursos minerales y energéticos programa de metalogenia proyecto GE 33; 95 Memoria sobre la geología económica de la región Piura INGEMMET, 2011.

RODRÍGUEZ. I.; VALENCIA. M.; VILLARREAL. E.; SÁNCHEZ V.; **Metalogenia. geología económica y potencial minero de la Deflexión de Huancabamba: noroeste del Perú.** INGEMMET. Boletín. Serie B: Geología Económica. 29. 7 mapas. 224 p., 2012.

RYBAK. M.; JONIAK. T.; GĄBKA. M.; SOBCZYŃSKI. T.; **The inhibition of growth and oospores production in Chara hispida L. as an effect of iron sulphate addition:**

**Conclusions for the use of iron coagulants in lake restoration.** Ecological Engineering. Volume 105. pp. 1-6, 2017.

SALAMA. E.; KIM. J. R.; JI. M.; CHO. D.; ABOU-SHANAB. R. A. I.; KABRA. A. N.; JEON. B.; **Application of acid mine drainage for coagulation/flocculation of microalgal biomass.** Bioresource Technology. Volume 186. pp. 232-237, 2015.

SATTERFIELD, P.E. **Jar Testing.** National Environmental Services Center; Tech Brief, v. 5, n. 1, pp. 1-4, 2005.

SCHIFFMAN. R. L.; **Finite and infinitesimal strain consolidation.** J. Geotech. Engrg. Div.. ASCE. 106(GT2). pp. 203-207, 1980.

SCHIFFMAN. R. L.; PANE. V.; GIBSON. R. E.; **The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays: IV. An overview of nonlinear finite strain sedimentation and consolidation.** In: YONG. R. N.; TOWNSEND. F. C. (Eds.) Sedimentation: consolidation models. ASCE. pp. 1-29, 1984.

SINGH. R.P.; KARMAKAR. G.P.; RATH. S.K.; KARMAKAR. N.C.; PANDEY. S.R.; TRIPATHY. T.; PANDA. J.; KANAN. K.; JAIN. S.K.; LAN. N.T.; **Biodegradable drag reducing agents and flocculants based on polysaccharides: materials and applications.** Polym. Eng. Sci., 40. pp. 46-60, 2000.

SIS. H.; CHANDER. S.; I; **Reagents used in the flotation of phosphate ores: a critical review.** Miner. Eng., 16. pp. 577-585, 2003.

SIS. H.; CHANDER. S.; II; **Improving froth characteristics and flotation recovery of phosphate ores with nonionic surfactants.** Minerals Engineering. 16 (7). pp. 587-595, 2003.

SKEI. J.M.; SYVITSKI. J.P.; **Natural flocculation of mineral particles in seawater-influence on mine tailings sea disposal and particle dispersal.** Mineralproduksjon. 3. pp. 1-10, 2013.

SOMOGYI. F.; **Analysis and prediction of phosphatic and consolidation: implementation package.** Lakeland: Florida Phosphatic Clay Research Project. Technical Report, 1979.

SPOTTISWOOD. D. J.; KELLY. E. G.; **Mineral Processing: An Introduction to the Principles** – 1ª edição – Colorado School of Mines, 1989.

STICKLAND. A.D.; **Solid-Liquid Separation in the Water and Wastewater Industries.** (PhD thesis) The University of Melbourne. 496 p., 2005.

- TAHA. Y.; BENZAAZOUA. M.; **Recent Trends in Phosphate Mining, Beneficiation and Related Waste Management**. Editorial for Special Issue. Minerals; 9(12):755. 2019.
- TAKAGI. S.; SUGIYAMA. K.; LI. S.; MATSUMOTO. Y.; **A Review of Full Eulerian Methods for Fluid Structure Interaction Problems**. Journal of Applied Mechanics. ASME. v. 79. n. 4. 7 p., 2011.
- TASSINARI. M.M.L.; **Estudos de caracterização tecnológica em amostras de minério fosfático de Bayovar**. São Paulo: LCT-Fundespa. 60 p., 2011.
- TERZAGHI. K.; FRÖHLICH. O. K.; **Theorie der setzung von tonschichten; eine einföhrung in die analytische tonmechanik**. Leipzig Germany: F. Deuticke. 168 p., 1936.
- THILL. A.; MOUSTIER S.; GARNIER J.-M.; ESTOURNEL C.; NAUDIN J.-J.; BOTTERO J.-Y.; **Evolution of particle size and concentration in the Rhone river mixing zone: influence of salt flocculation**. Continental Shelf Research 21: pp. 2127-2140, 2001.
- TORFS. E.; NOPENS I.; WINKLER M. K.H.; VANROLLEGHEM P. A.; BALEMANS S.; SMETS. I. Y.; **Experimental methods in wastewater treatment - Settling Tests**. Chapter 3 IWA Publishing. London. UK pp. 235-262, 2016.
- UNIDO. UNITED NATIONALS INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION e IFDC INTERNATIONAL FERTILIZER DEVELOPMENT CENTER; **Fertilizer Manual**. Springer Science & Business Media. ISBN 0-7923-5032-4. pp. 90-92, 1998.
- VEEH. H. H.; BURNETT. W. C.; SOUTAR. A.; **Contemporary Phosphorites on the Continental Margin of Peru**. Science 31: Vol. 181. Issue 4102. DOI: 10.1126/science.181.4102.844. pp. 844-845, 1973.
- VICK. S.G.; **Planning. Design. and Analysis of Tailings Dams**. Wiley Interscience. New York. ISBN-13: 978-0471898290. 369 p., 1983.
- WANG. H.; MIN. X.; CHAI. L.; SHU. Y.; **Biological preparation and application of poly-ferric sulfate flocculant**. Transaction of Nonferrous Metals Society of China. Volume 21. Issue 11. pp. 2542-2547, 2011.
- WANG. J.; CHEN. C.; **Chitosan-based biosorbents: modification and application for biosorption of heavy metals and radionuclides**. Bioresour. Technol., 160. pp. 129-141, 2014.

WILLS, B. A.; FINCH, J. A.; FRSC, FCIM, P.Eng.; **An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery**, Wills' Mineral Processing Technology (Eighth Edition) pp. 439-448, 2016.

WINTERWERP. J. C.; **A simple model for turbulence induced flocculation of cohesive sediment**. J. Hyd. Eng., 36 (3). pp. 309-326, 1998.

XIONG. B.; LOSS. R. D.; SHIELDS. D.; PAWLIK. T.; HOCHREITER. R.; ZYDNEY. A. L.; KUMAR. M.; **Polyacrylamide degradation and its implications in environmental systems**. NPJ Clean Water 1. <https://doi.org/10.1038/s41545-018-0016-8>. 17 p., 2018.

YAN, B.; HAN, L.; XIAO, H.; ZHANG, J.; HUANG, J.; HU, W.; GU, Y.; LIU, Q.; ZENG, H.; **Rapid Dewatering and Consolidation of Concentrated Colloidal Suspensions: Mature Fine Tailings via Self-Healing Composite Hydrogel**, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 21610-21618 DOI: 10.1021/acsami.9b05692, 2019.

YAO. T. C.; OLIVEIRA FILHO. W. L.; CAI. X. C.; ZNIDARCIC. D.; **Numerical solution for consolidation and desiccation of soft soils**. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. v. 26. pp. 139-161, 2002.

YAO. T. C.; ZNIDARCIC. D.; **User's manual for computer program CONDES0**. Boulder. Colorado: Department of Civil. Environmental and Architectural Engineering. University of Colorado. 98 p., 1997.

ZEMMOURI. H.; DROUICHE. M.; SAYEH. A.; LOUNICI. H.; MAMERI. N.; **Coagulation Flocculation Test of Keddara's Water Dam Using Chitosan and Sulfate Aluminium**. Procedia Engineering. Volume 33. pp. 254-260, 2012.

ZHANG. P. ; ZHENG. S. ; SONG. W. et al. **Promising Options for Solving the Dolomite Problem of the Florida Phosphate Resources—a Brief Review**. Mining, Metallurgy & Exploration 36, pp. 117–129, 2019.

ZHAO. Y.Q. (I); **Settling behaviour of polymer flocculated water-treatment sludge I: analyses of settling curves**. Sep. Purif. Technol., 35. pp. 71-80, 2004.

ZHAO. Y.Q. (II); **Settling behaviour of polymer flocculated water-treatment sludge II: effects of floc structure and floc packing**. Sep. Purif. Technol., 35. pp. 175-183, 2004.

ZHENG. H.; XIONG. Z.; SUN. Y.; TAN. M.; CHEN. W.; WANG. Y.; TANG. X.; **Synthesis and characterization of hydrophobic associating cationic polyacrylamide flocculant for sludge dewatering**. JCAEE. 26 (13). pp. 3769-3773, 2014.

ZHOU. Y.; FRANKS. G.V.; **Flocculation mechanism induced by cationic polymers investigated by light scattering**. Langmuir 22: pp. 6775–6786, 2006.

ZHOU. Y.; LIANG. Z.; WANG Y.; **Decolorization and COD removal of secondary yeast wastewater effluents by coagulation using aluminum sulfate**. Desalination. Volume 225. Issues 1–3. 1. pp. 301-311, 2008.

ZHU. G.; ZHENG. H.; CHEN. W.; FAN. W.; ZHANG. P.; Tshukudu T.; **Preparation of a composite coagulant: Polymeric aluminum ferric sulfate (PAFS) for wastewater treatment**. Desalination. Volume 285. 31. pp. 315-323, 2012.

ZNIDARCIC. D.; GJERAPIC. G.; CARRIER. D.; ZHANG. P.; **Crusting of phosphatic ponds due to dessication laboratory and fiel study - Report on task 17: Laboratory and centrifuge tests on phosphatic clay samples**. Boulder. Colorado: University of Colorado. 63 p., 2000.

ZNIDARCIC. D.; ABU-HEJLEH. A. N.; FAIRBANKS. T.; ROBERTSON. A.; Seepage induced consolidation test. equipment description and user's manual. **Reported Prepared for Florida Institute of Phosphate Research**. Department of Civil. Environmental and Architectural Engineering. University of Colorado. Boulder. Colorado. 63 p., 1992.

ZNIDARCIC. D.; **Laboratory determination of consolidation properties of cohesive soils**. 172f. PhD. Thesis – Department of Civil. Environmental and Architectural Engineering. University of Colorado. Boulder. Colorado, 1982.



## APÊNDICE A

Tabela A.1 – Dados iniciais para o ensaio com Sw de 8,5% com sulfato de alumínio

Teor de Sólidos 8,5 %					
Proveta	Sw (%)	w (%)	Concentração de Coagulante (ppm)	pH	Condutividade Elétrica (mV)
01	08,48	1078,71	Natural	7,44	20,00
02	08,52	1073,74	20	7,03	22,10
03	08,53	1072,10	40	6,82	34,80
04	08,48	1079,14	60	6,73	40,30
05	08,49	1077,75	80	6,58	50,20
06	08,49	1077,44	100	6,47	57,00
07	08,46	1082,25	120	6,41	60,90

Tabela A.2 – Dados iniciais para o ensaio com Sw de 11% com sulfato de alumínio

Teor de Sólidos 11 %					
Proveta	Sw (%)	w (%)	Concentração de Coagulante (ppm)	pH	Condutividade Elétrica (mV)
08	11,03	806,33	Natural	7,23	22,00
09	11,01	808,40	20	6,91	28,80
10	11,01	808,19	40	6,79	36,50
11	10,98	811,08	60	6,68	43,90
12	10,98	810,44	80	6,59	49,80
13	10,98	811,08	100	6,52	54,00
14	10,94	813,67	120	6,46	57,50

Tabela A.3 – Dados iniciais para o ensaio com Sw de 13,5% com sulfato de alumínio

Teor de Sólidos 13,5 %					
Proveta	Sw (%)	w (%)	Concentração de Coagulante (ppm)	pH	Condutividade Elétrica (mV)
15	13,51	640,31	Natural	7,32	23,50
16	13,50	640,67	20	7,00	27,90
17	13,49	641,37	40	6,89	30,60
18	13,49	641,33	60	6,80	36,20
19	13,50	640,57	80	6,69	43,00
20	13,47	642,21	100	6,61	48,30
21	13,45	643,51	120	6,55	52,20

Tabela A.4 – Dados iniciais para o ensaio com Sw de 16% com sulfato de alumínio

Teor de Sólidos 16 %					
Proveta	Sw (%)	w (%)	Concentração de Coagulante (ppm)	pH	Condutividade Elétrica (mV)
01	16,02	524,05	Natural	7,29	15,30
02	15,97	526,06	20	7,23	20,50
03	15,98	525,84	40	7,09	29,20
04	16,00	525,04	60	6,93	37,30
05	15,98	525,89	80	6,71	42,00
06	15,99	525,59	100	6,58	51,10
07	15,95	526,88	120	6,58	54,30

Tabela A.5– Dados iniciais para o ensaio com Sw de 18,5% com sulfato de alumínio

Teor de Sólidos 18,5 %					
Proveta	Sw (%)	w (%)	Concentração de Coagulante (ppm)	pH	Condutividade Elétrica (mV)
08	18,49	440,71	Natural	7,42	10,40
09	18,49	440,84	20	7,36	14,20
10	18,47	441,43	40	7,32	16,60
11	18,47	441,33	60	7,28	18,90
12	18,48	441,26	80	7,26	20,30
13	18,46	441,83	100	7,23	21,90
14	18,44	442,16	120	7,19	25,40

Tabela A.6 – Dados iniciais para o ensaio com Sw de 21% com sulfato de alumínio

Teor de Sólidos 21 %					
Proveta	Sw (%)	w (%)	Concentração de Coagulante (ppm)	pH	Condutividade Elétrica (mV)
15	20,96	377,13	Natural	7,85	3,80
16	20,95	377,38	20	7,59	5,10
17	20,95	377,30	40	7,47	7,30
18	20,96	377,17	60	7,42	10,50
19	20,94	377,47	80	7,37	13,20
20	20,93	377,88	100	7,31	16,80
21	20,96	377,08	120	7,21	21,00

## APÊNDICE B

**Sw = 8,5%**

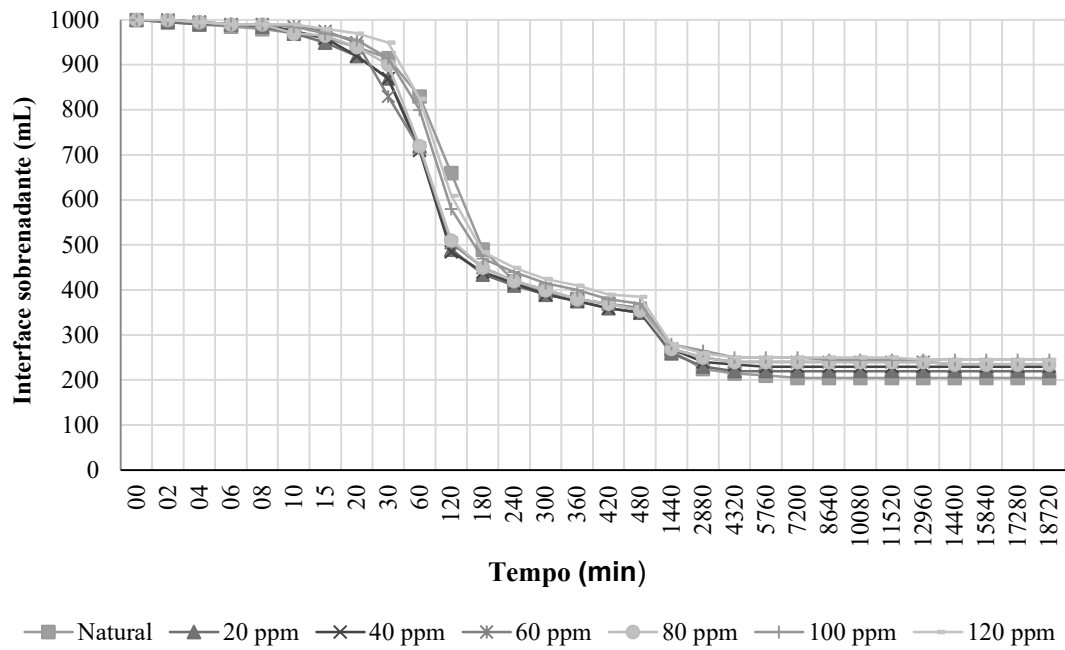


Figura B.1 - Curvas de sedimentação para um  $S_w$  de 8,5% com sulfato de alumínio como coagulante com diferentes concentrações

**Sw = 11%**

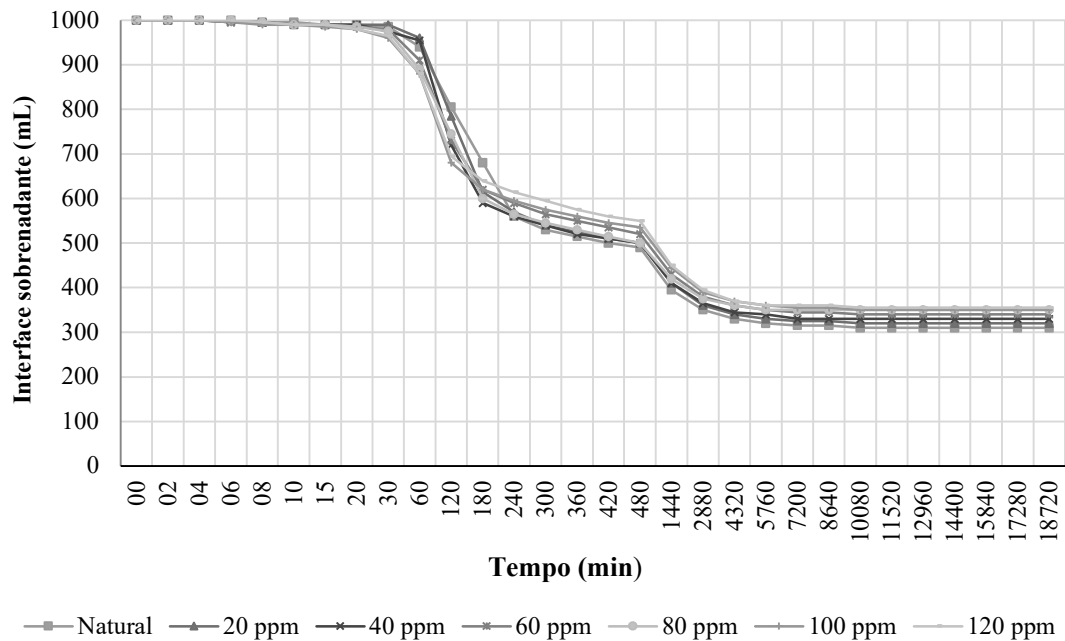


Figura B.2 - Curvas de sedimentação para um  $S_w$  de 11% com sulfato de alumínio como coagulante com diferentes concentrações

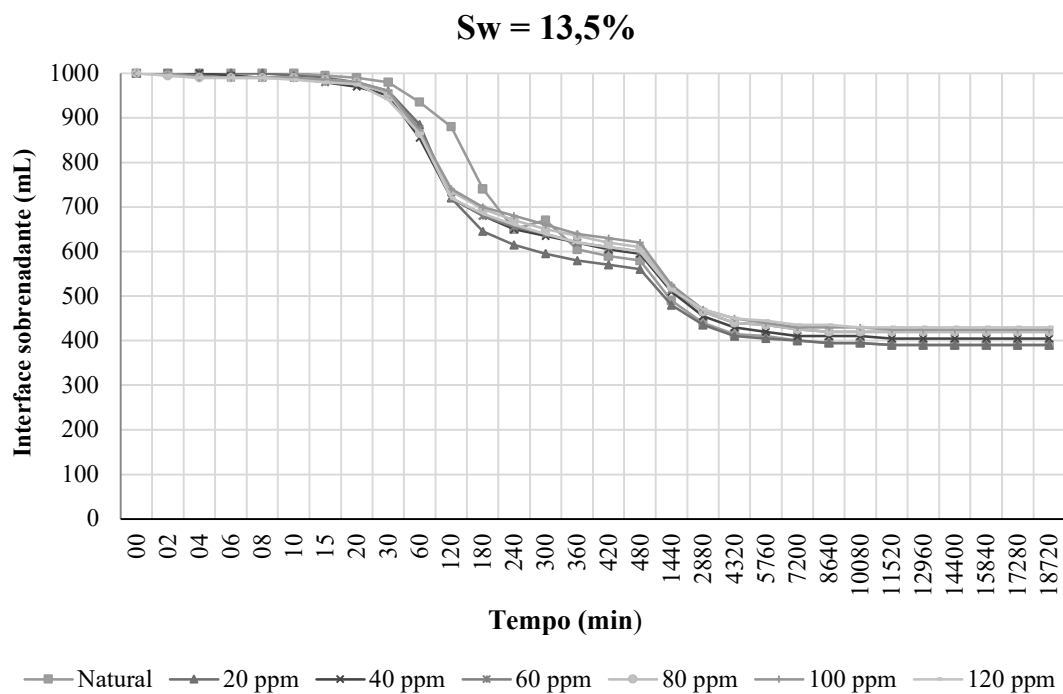


Figura B.3 - Curvas de sedimentação para um Sw de 13,5% com sulfato de alumínio como coagulante com diferentes concentrações

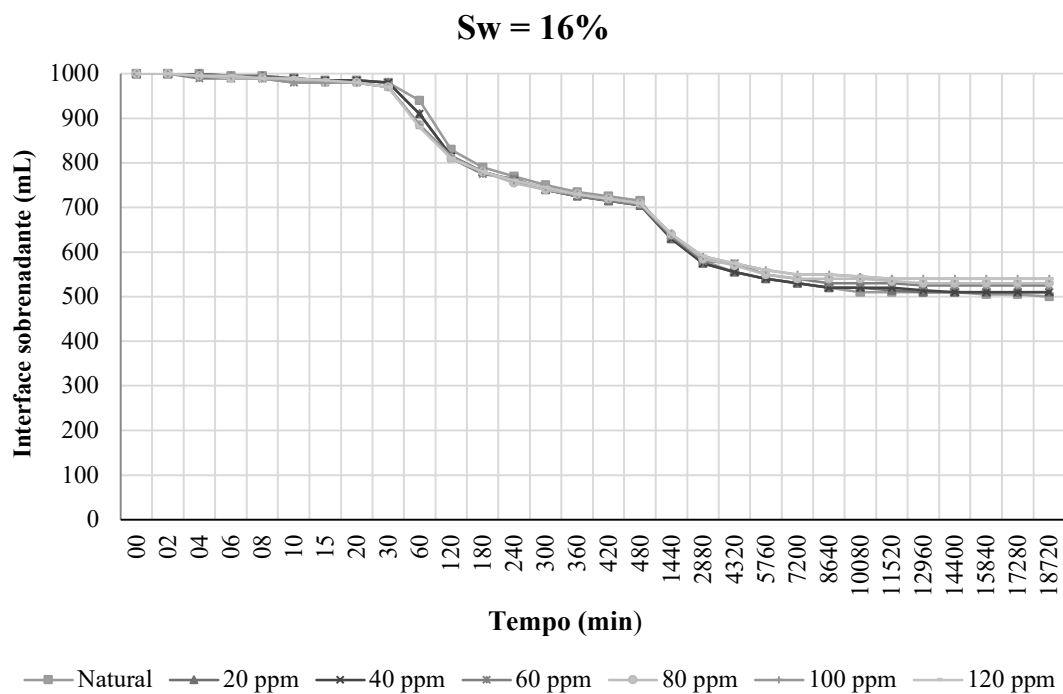


Figura B.4 - Curvas de sedimentação para um Sw de 16% com sulfato de alumínio como coagulante com diferentes concentrações

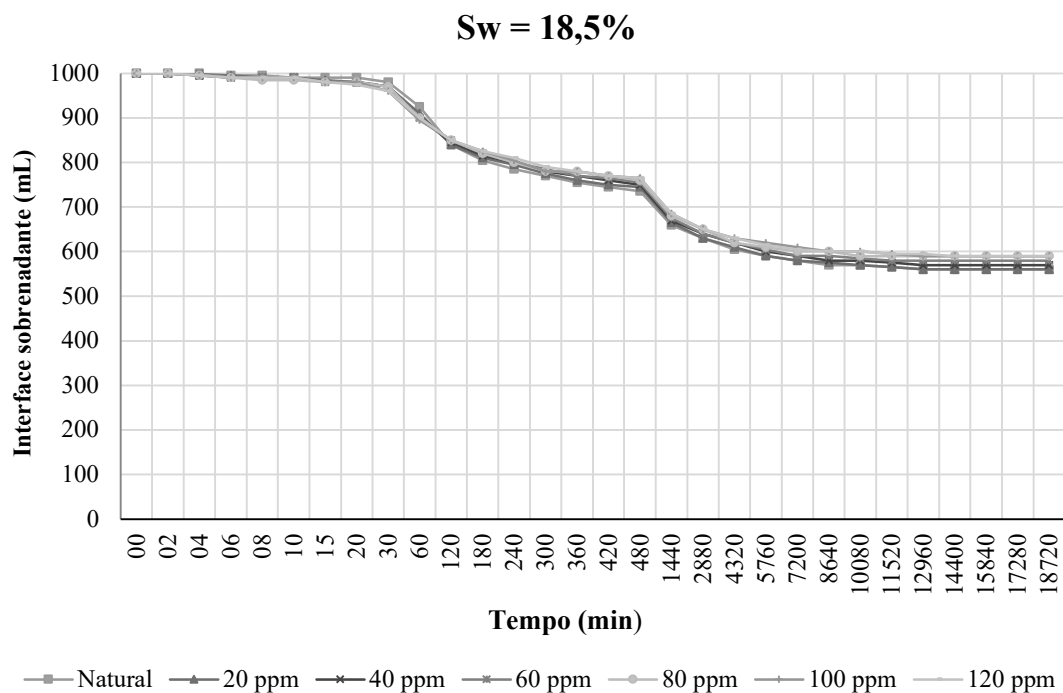


Figura B.5 - Curvas de sedimentação para um Sw de 18,5% com sulfato de alumínio como coagulante com diferentes concentrações

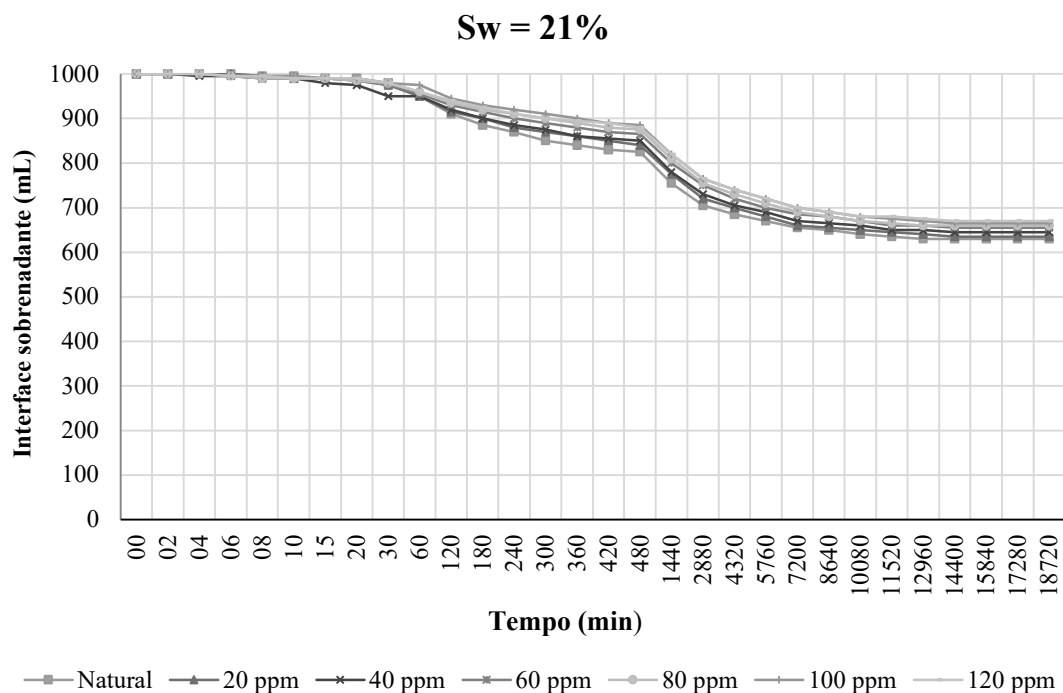


Figura B.6 - Curvas de sedimentação para um Sw de 21% com sulfato de alumínio como coagulante com diferentes concentrações

## APÊNDICE C

Tabela C.1 – Dados iniciais para o ensaio de Sw de 8,5% com sulfato de ferro

Teor de Sólidos 8,5 %					
Proveta	Sw (%)	w (%)	Concentração de coagulante (ppm)	pH	Condutividade Elétrica (mV)
01	08,60	1063,16	Natural	7,71	-17,20
02	08,55	1069,51	20	7,59	-9,10
03	08,58	1065,47	40	7,55	-6,50
04	08,58	1065,39	60	7,50	-3,30
05	08,55	1069,47	80	7,46	-0,80
06	08,52	1073,94	100	7,42	1,40
07	08,49	1077,51	120	7,36	5,30

Tabela C.2 – Dados iniciais para o ensaio de Sw de 11% com sulfato de ferro

Teor de Sólidos 11 %					
Proveta	Sw (%)	w (%)	Concentração de coagulante (ppm)	pH	Condutividade Elétrica (mV)
08	11,12	799,64	Natural	7,39	3,40
09	11,07	803,34	20	7,34	6,50
10	11,11	800,17	40	7,29	10,10
11	11,10	800,84	60	7,20	15,70
12	11,10	800,77	80	7,10	22,30
13	11,08	802,21	100	7,04	26,10
14	10,98	810,56	120	6,89	32,80

Tabela C.3 – Dados iniciais para o ensaio de Sw de 13,5% com sulfato de ferro

Teor de Sólidos 13,5 %					
Proveta	Sw (%)	w (%)	Concentração de coagulante (ppm)	pH	Condutividade Elétrica (mV)
15	13,56	637,37	Natural	7,70	-16,40
16	13,56	637,60	20	7,57	-7,80
17	13,50	640,47	40	7,49	-2,70
18	13,53	639,37	60	7,38	4,00
19	13,57	637,03	80	7,30	9,10
20	13,51	640,11	100	7,02	14,90
21	13,55	637,98	120	7,14	19,80

## APÊNDICE D

**Sw = 8,5%**

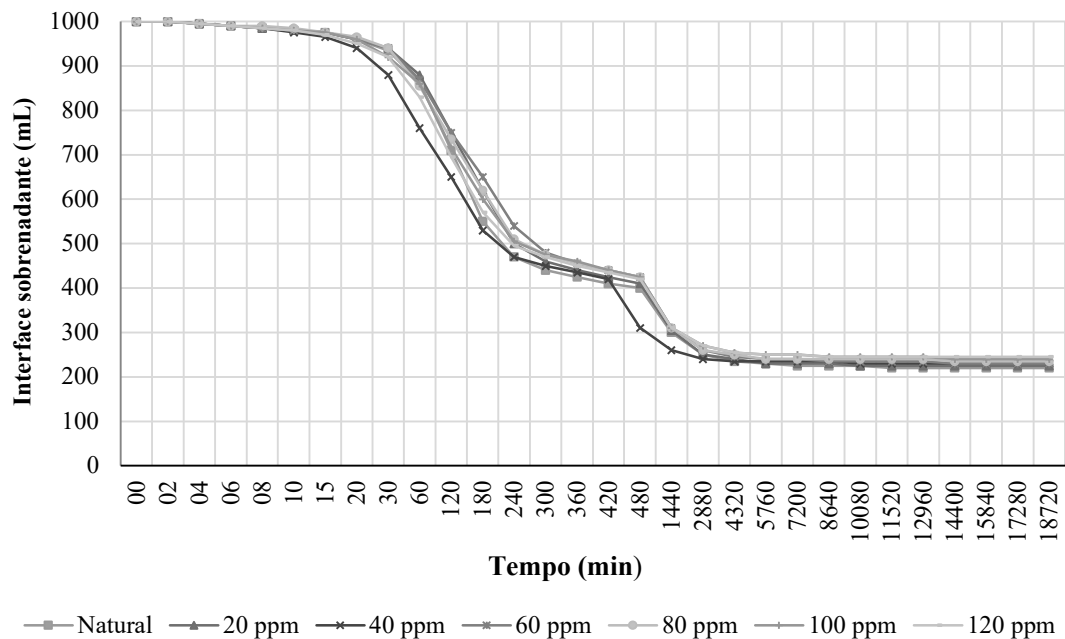


Figura D.1 - Curvas de sedimentação para um Sw de 8,5% com sulfato de ferro como coagulante com diferentes concentrações

**Sw = 11%**

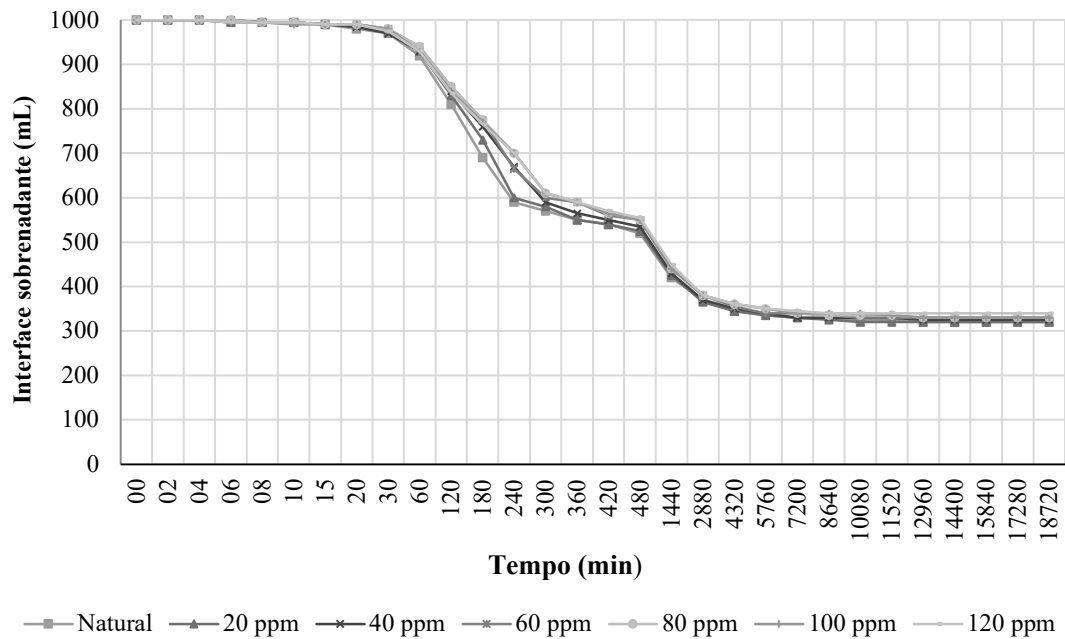


Figura D.2 - Curvas de sedimentação para um Sw de 11% com sulfato de ferro como coagulante com diferentes concentrações

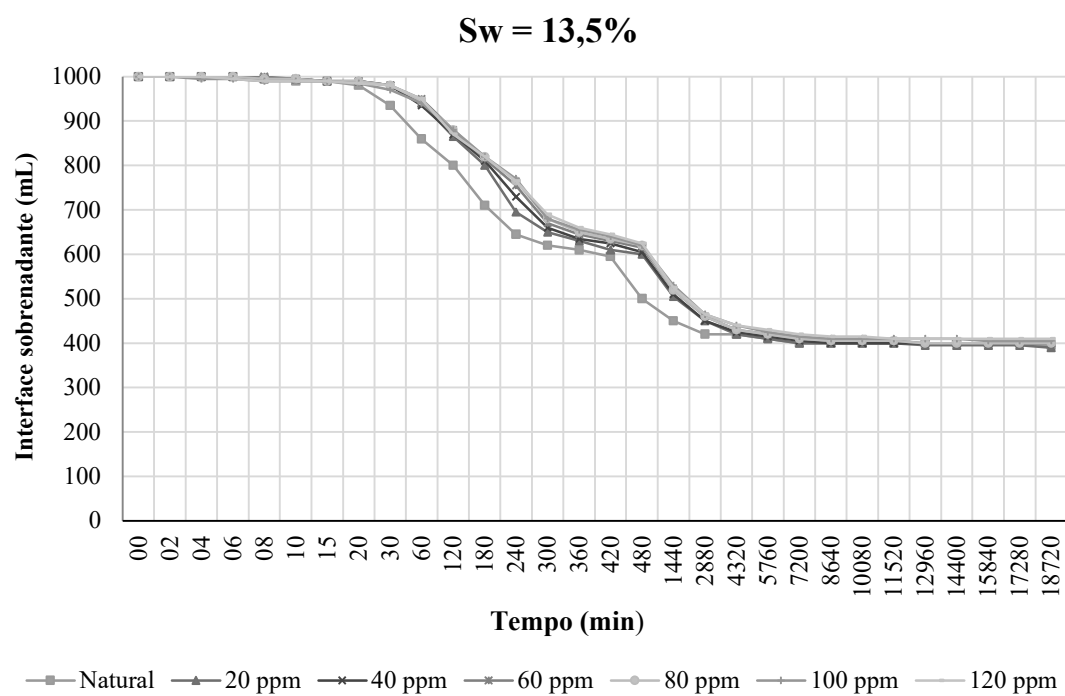


Figura D.3 - Curvas de sedimentação para um Sw de 13,5% com sulfato de ferro como coagulante com diferentes concentrações



## APÊNDICE E

Tabela E.1 – Dados iniciais para o ensaio de Sw de 8,5% com C-498  
Teor de Sólidos 8,5 %

Proveta	Sw (%)	w (%)	Concentração de Floculante (ppm)	pH	Condutividade Elétrica (mV)
01	08,51	1077,55	Natural	7,67	-46,90
02	08,51	1077,55	20	7,38	-35,20
03	08,48	1079,65	40	7,23	-28,80
04	08,52	1075,85	60	7,14	-25,20
05	08,50	1085,24	80	7,10	-23,40
06	08,52	1075,65	100	7,03	-20,50
07	08,49	1080,02	120	6,99	-19,10

Tabela E.2 – Dados iniciais para o ensaio de Sw de 11% com C-498  
Teor de Sólidos 11 %

Proveta	Sw (%)	w (%)	Concentração de Floculante (ppm)	pH	Condutividade Elétrica (mV)
08	11,02	807,56	Natural	7,58	-43,20
09	11,06	803,87	20	7,21	-27,90
10	11,04	805,50	40	7,05	-21,40
11	11,05	804,63	60	6,89	-15,00
12	11,18	802,13	80	6,78	-10,30
13	11,17	805,87	100	6,70	-7,40
14	10,97	811,28	120	6,67	-5,70

Tabela E.3 – Dados iniciais para o ensaio de Sw de 11% com C-498  
Teor de Sólidos 13,5 %

Proveta	Sw (%)	w (%)	Concentração de Floculante (ppm)	pH	Condutividade Elétrica (mV)
15	13,53	638,99	Natural	7,46	-38,40
16	13,54	638,29	20	7,18	-26,70
17	13,54	638,66	40	7,04	-21,00
18	13,58	636,29	60	6,91	-15,80
19	13,45	643,35	80	6,85	-13,50
20	13,47	642,63	100	6,82	-12,10
21	13,49	641,29	120	6,77	-10,20

Tabela E.4 – Dados iniciais para o ensaio de Sw de 16% com C-498

Teor de Sólidos 16 %					
Proveta	Sw (%)	w (%)	Concentração de Flocculante (ppm)	pH	Condutividade Elétrica (mV)
01	16,01	525,78	Natural	7,5	-39,80
02	16,03	560,20	20	7,28	-30,80
03	16,01	525,78	40	7,09	-23,30
04	15,98	525,65	60	6,96	-17,70
05	15,96	526,84	80	6,86	-13,70
06	16,12	520,51	100	6,80	-11,20
07	15,98	525,32	120	6,73	-8,50

Tabela E.5 – Dados iniciais para o ensaio de Sw de 18,5% com C-498

Teor de Sólidos 18,5 %					
Proveta	Sw (%)	w (%)	Concentração de Flocculante (ppm)	pH	Condutividade Elétrica (mV)
08	18,51	444,22	Natural	7,46	-38,30
09	18,53	440,79	20	7,27	30,60
10	18,57	438,98	40	7,11	-23,80
11	18,49	440,71	60	7,01	-20,10
12	18,52	443,89	80	6,94	-17,20
13	18,53	440,72	100	6,91	-15,70
14	18,48	442,11	120	6,83	-12,70

Tabela E.6 – Dados iniciais para o ensaio de Sw de 21% com C-498

Teor de Sólidos 21 %					
Proveta	Sw (%)	w (%)	Concentração de Flocculante (ppm)	pH	Condutividade Elétrica (mV)
15	20,96	377,11	Natural	7,44	-18,90
16	20,95	377,20	20	7,34	-12,90
17	21,01	360,99	40	7,3	-11,40
18	20,98	378,15	60	7,26	-9,40
19	20,97	379,87	80	7,2	-7,20
20	20,90	380,69	100	7,19	-6,70
21	20,91	379,99	120	7,13	-4,10

## APÊNDICE F

**Sw = 8,5%**

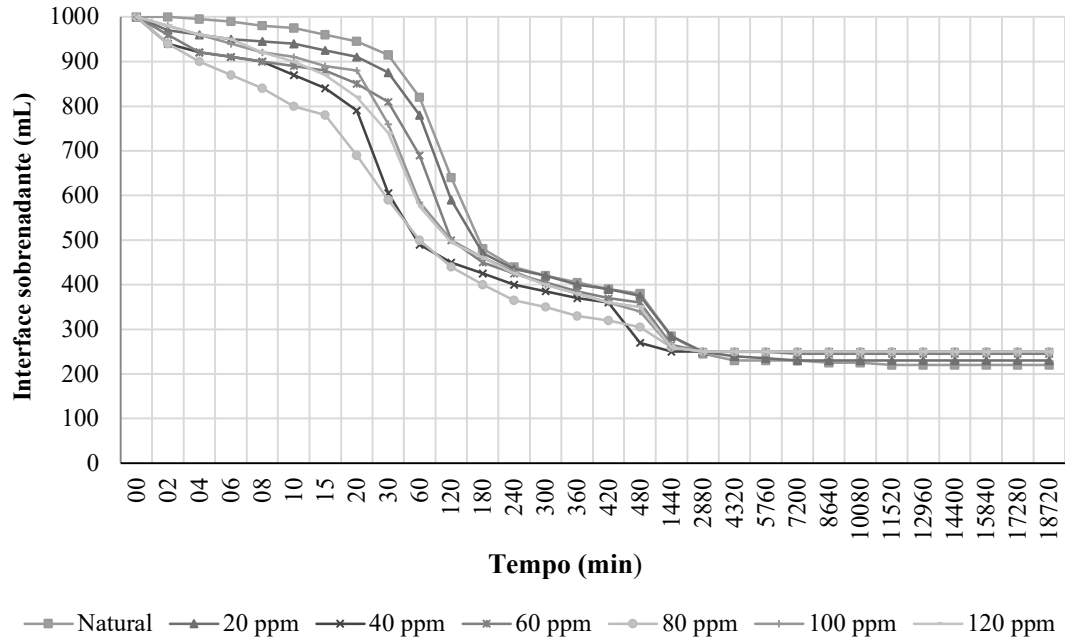


Figura F.1 - Curvas de sedimentação para um  $Sw$  de 8,5% com C-498 como floculante orgânico com diferentes concentrações

**Sw = 11%**

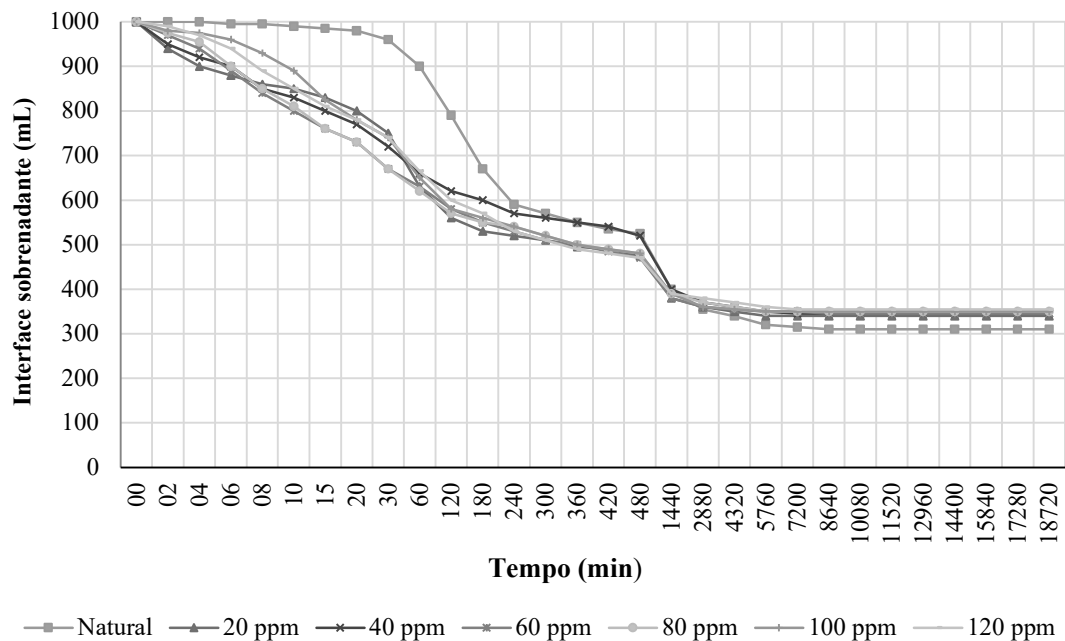


Figura F.2 - Curvas de sedimentação para um  $Sw$  de 11% com C-498 como floculante orgânico com diferentes concentrações

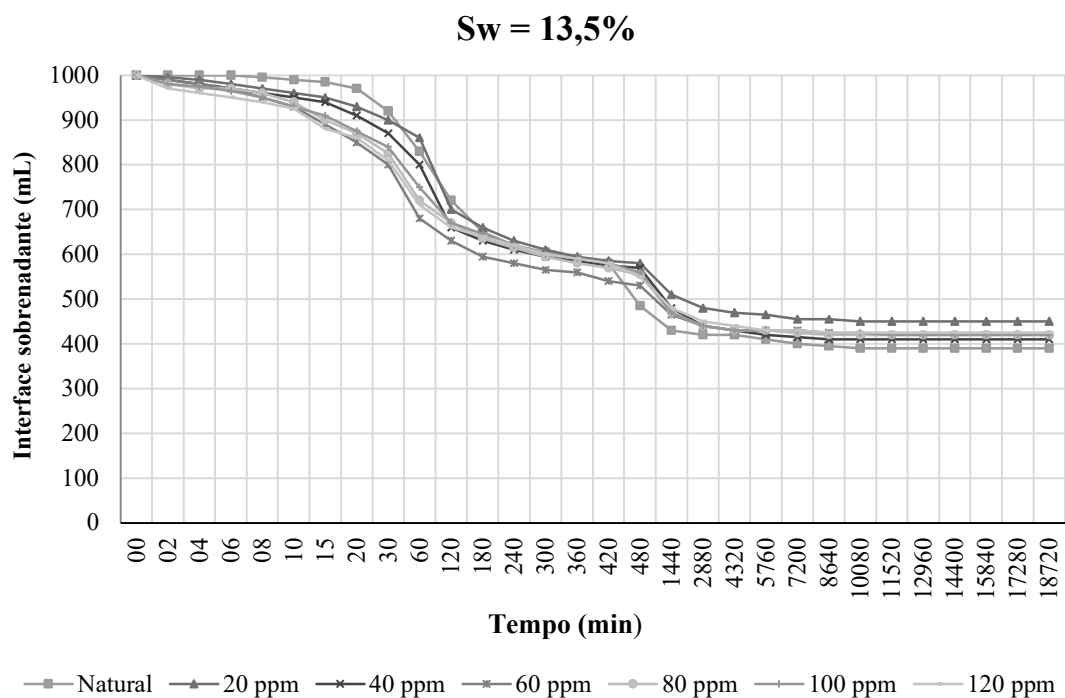


Figura F.3 - Curvas de sedimentação para um Sw de 13,5% com C-498 como flocculante orgânico com diferentes concentrações

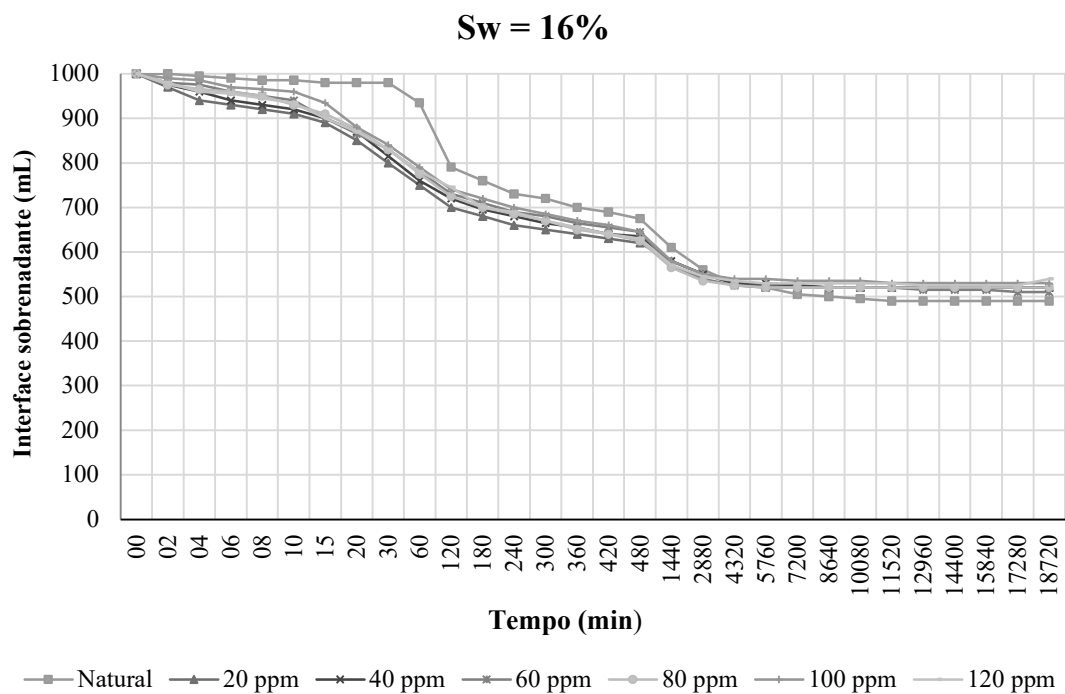


Figura F.4 - Curvas de sedimentação para um Sw de 16% com C-498 como flocculante orgânico com diferentes concentrações

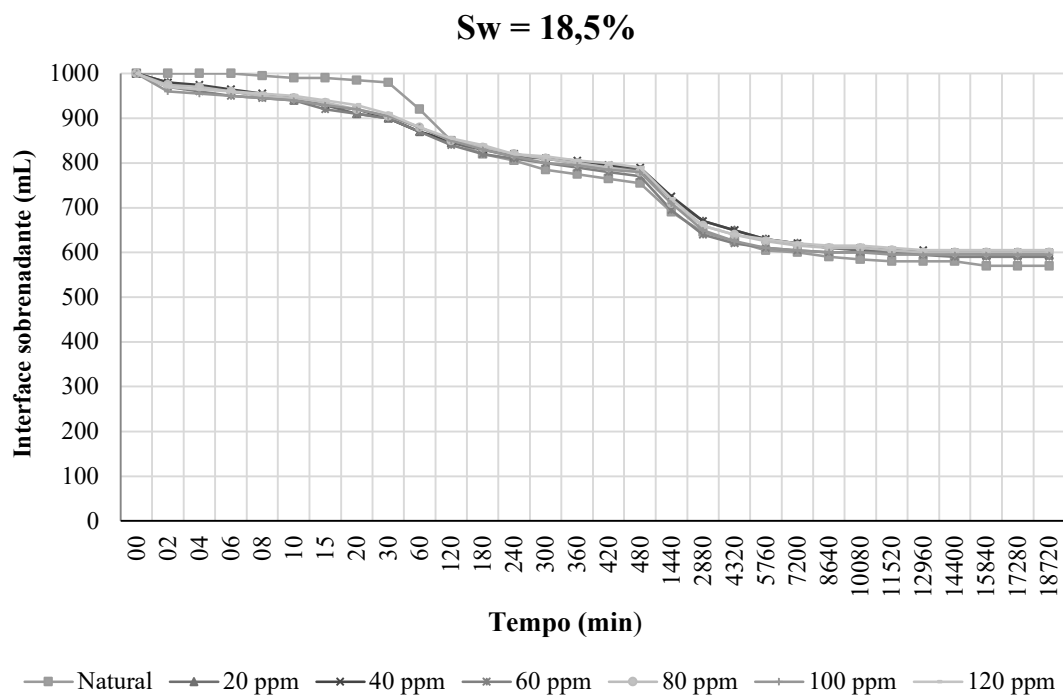


Figura F.5 - Curvas de sedimentação para um Sw de 18,5% com C-498 como floculante orgânico com diferentes concentrações

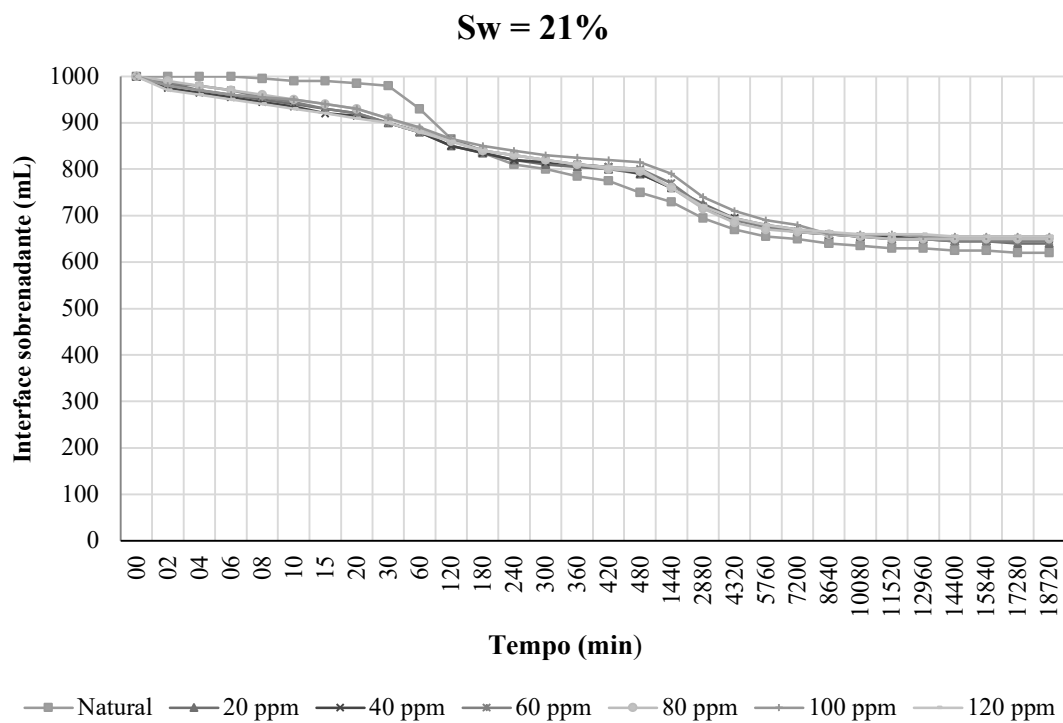


Figura F.6 - Curvas de sedimentação para um Sw de 21% com C-498 como floculante orgânico com diferentes concentrações

## APÊNDICE G

Tabela G.1 – Dados iniciais para o ensaio de 8,5% de teor de sólidos com secagem em estufa usando sulfato de alumínio

Teor de Sólidos 8,5 %					
Proveta	Sw (%)	w (%)	Concentração de coagulante (ppm)	pH	Condutividade Elétrica (mV)
06	08,51	1075,25	Natural	7,97	-22,20
07	08,52	1073,86	20	7,96	-21,90
08	08,51	1075,36	40	7,96	-21,50
09	08,52	1074,18	60	7,95	-20,70
14	08,51	1074,49	80	7,86	-19,10
15	08,51	1075,13	100	7,77	-18,40
16	08,50	1076,08	120	7,74	-10,40

Tabela G.2 – Dados iniciais para o ensaio de 11% de teor de sólidos com secagem em estufa usando sulfato de alumínio

Teor de Sólidos 11 %					
Proveta	Sw (%)	w (%)	Concentração de coagulante (ppm)	pH	Condutividade Elétrica (mV)
06	11,12	799,09	Natural	8,48	-55,80
07	11,08	802,59	20	8,46	-53,60
08	11,05	805,15	40	8,46	-52,60
09	11,05	804,85	60	8,44	-51,40
14	11,08	802,38	80	8,44	-51,10
15	11,06	804,47	100	8,43	-50,10
16	11,01	808,69	120	8,41	-49,30

Tabela G.3 – Dados iniciais para o ensaio de 13,5% de teor de sólidos com secagem em estufa usando sulfato de alumínio

Teor de Sólidos 13,5 %					
Proveta	Sw (%)	w (%)	Concentração de coagulante (ppm)	pH	Condutividade Elétrica (mV)
06	13,57	637,10	Natural	8,26	-49,90
07	13,53	638,93	20	8,25	-49,70
08	13,48	642,48	40	8,25	-44,50
09	13,55	637,85	60	8,24	-43,70
14	13,53	638,85	80	8,22	-42,70
15	13,51	640,29	100	8,21	-45,50
16	13,49	641,05	120	8,21	-42,10

Tabela G.4 – Dados iniciais para o ensaio de 16% de teor de sólidos com secagem em estufa usando sulfato de alumínio

Teor de Sólidos 16 %					
Proveta	Sw (%)	w (%)	Concentração de coagulante (ppm)	pH	Condutividade Elétrica (mV)
06	16,06	522,54	Natural	8,20	-45,40
07	16,03	524,01	20	8,19	-45,20
08	16,01	524,55	40	8,18	-43,00
09	16,03	523,80	60	8,18	-42,60
14	16,04	523,28	80	8,17	-41,00
15	16,02	524,31	100	8,17	-40,40
16	16,04	523,54	120	8,14	-40,10

Tabela G.5 – Dados iniciais para o ensaio de 18,5% de teor de sólidos com secagem em estufa usando sulfato de alumínio

Teor de Sólidos 18,5 %					
Proveta	Sw (%)	w (%)	Concentração de coagulante (ppm)	pH	Condutividade Elétrica (mV)
06	18.48	441.26	Natural	8.16	-43.40
07	18.49	440.71	20	8.13	-42.90
08	18.49	440.71	40	8.10	-42.40
09	18.47	441.43	60	8.05	-41.80
14	18.47	441.43	80	8.03	-39.50
15	18.44	442.16	100	7.98	-35.70
16	18.46	441.83	120	7.91	-22.20

Tabela G.6 – Dados iniciais para o ensaio de 21% de teor de sólidos com secagem em estufa usando sulfato de alumínio

Teor de Sólidos 21 %					
Proveta	Sw (%)	w (%)	Concentração de coagulante (ppm)	pH	Condutividade Elétrica (mV)
06	20.96	377.13	Natural	8.11	-42.60
07	20.96	377.13	20	8.08	-42.30
08	20.96	377.13	40	8.02	-39.40
09	20.95	377.30	60	7.96	-35.60
14	20.95	377.30	80	7.89	-34.70
15	20.93	377.88	100	7.84	-34.20
16	20.93	377.88	120	7.76	-32.40

## APÊNDICE H

**Sw = 8,5%**

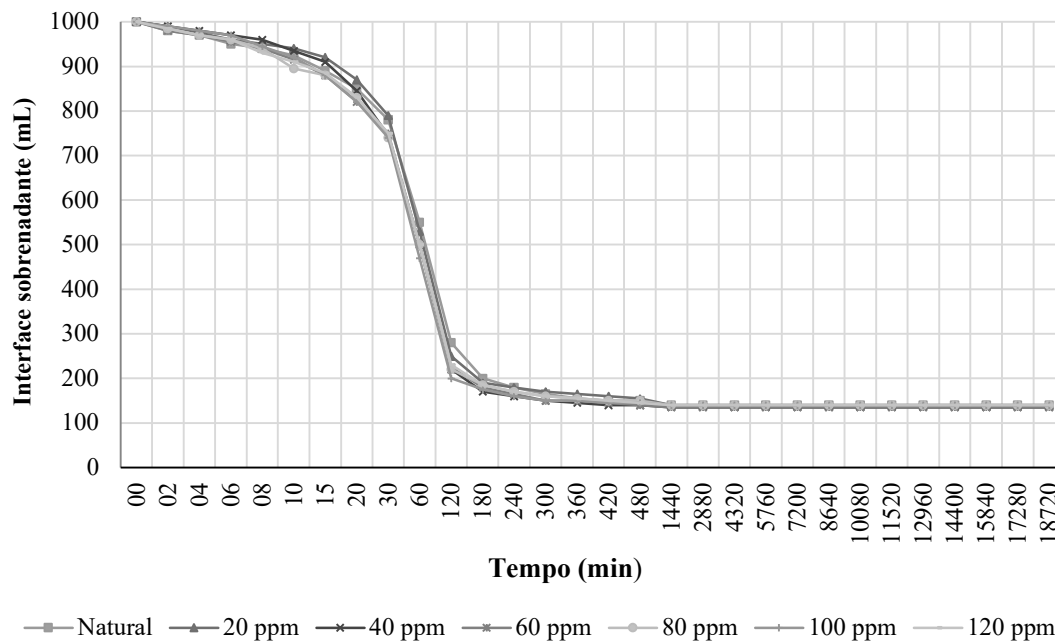


Figura H.1 - Curvas de sedimentação com rejeito secado em estufa para um  $S_w$  de 8,5% com sulfato de alumínio como coagulante com diferentes concentrações

**Sw = 11%**

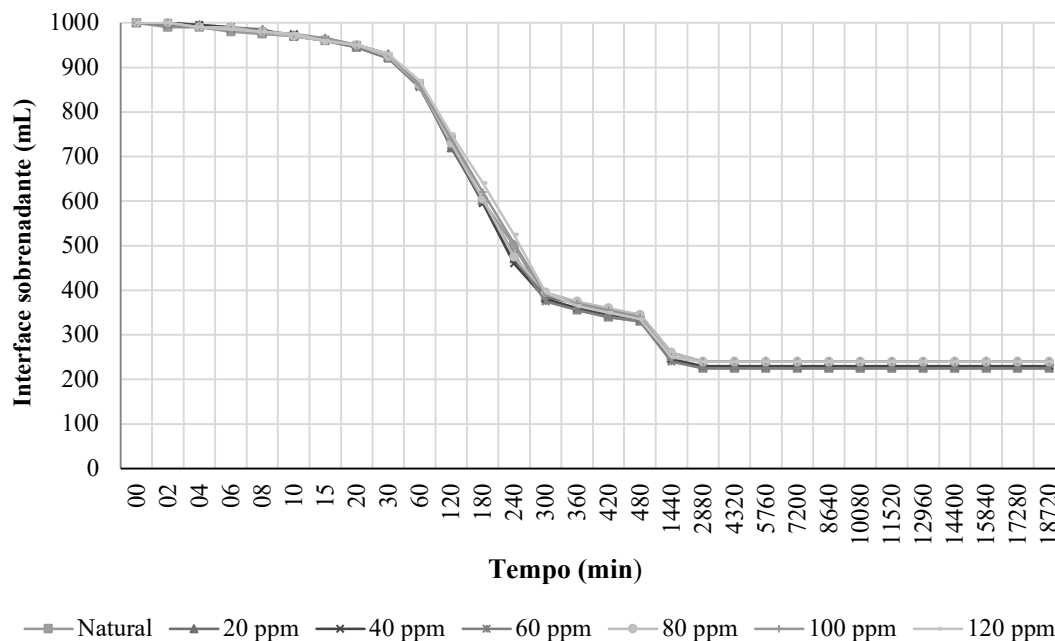


Figura H.2 - Curvas de sedimentação com rejeito secado em estufa para um  $S_w$  de 11% com sulfato de alumínio como coagulante com diferentes concentrações



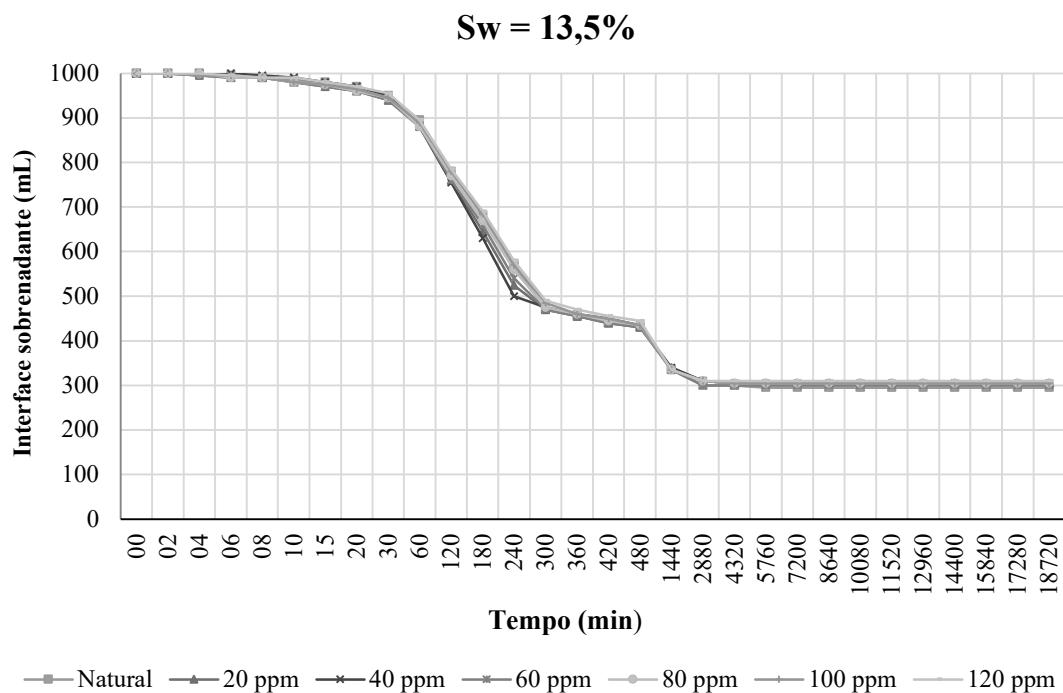


Figura H.3 - Curvas de sedimentação com rejeito secado em estufa para um Sw de 13,5% com sulfato de alumínio como coagulante com diferentes concentrações

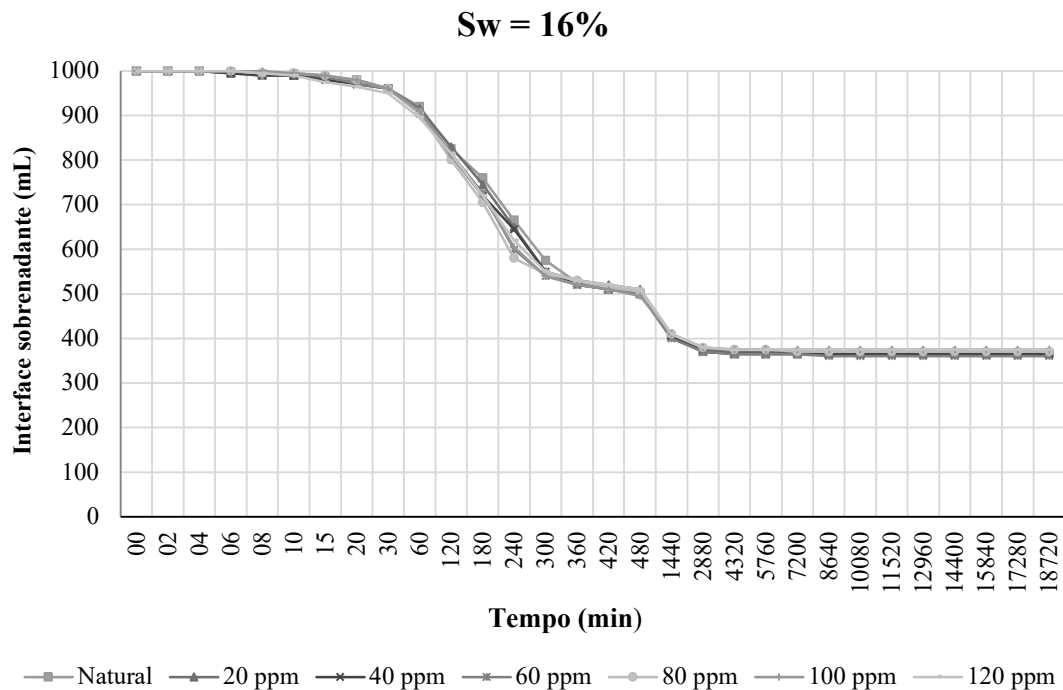


Figura H.4 - Curvas de sedimentação com rejeito secado em estufa para um Sw de 16% com sulfato de alumínio como coagulante com diferentes concentrações

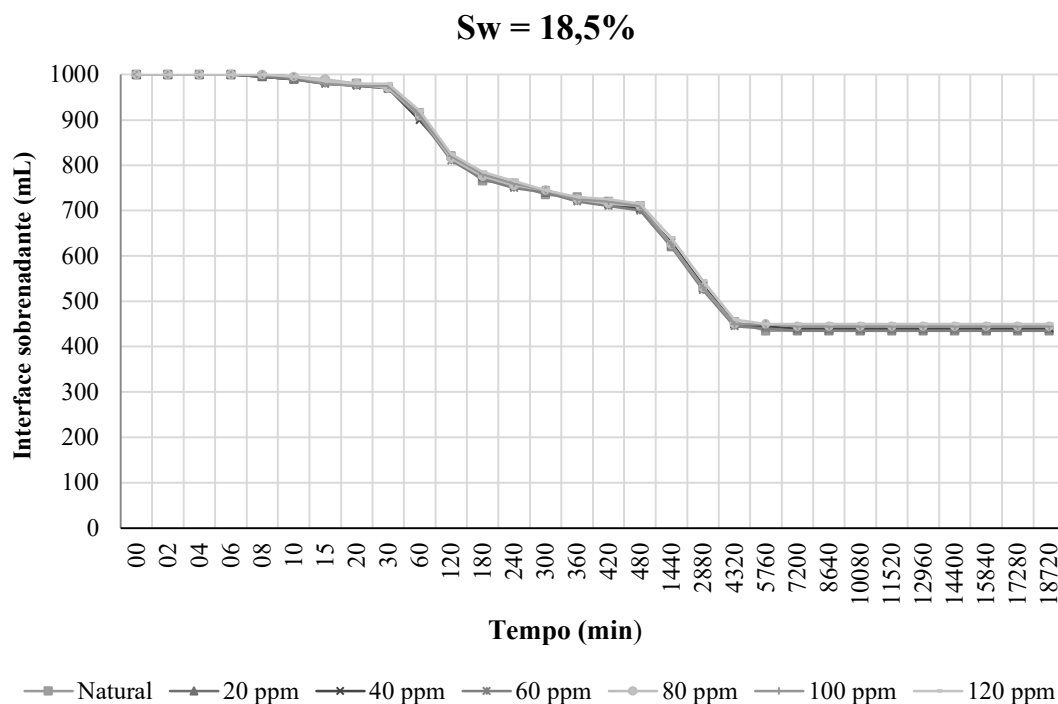


Figura H.5 - Curvas de sedimentação com rejeito secado em estufa para um Sw de 18,5% com sulfato de alumínio como coagulante com diferentes concentrações

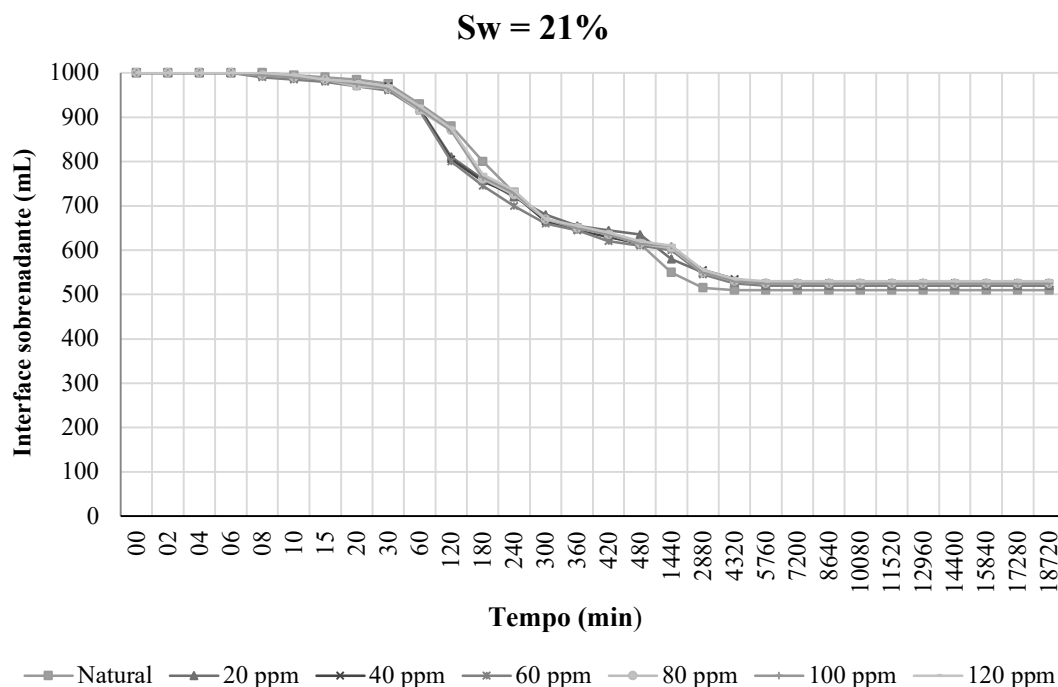


Figura H.6 - Curvas de sedimentação com rejeito secado em estufa para um Sw de 21% com sulfato de alumínio como coagulante com diferentes concentrações

## APÊNDICE I

### *Equação padronizada para o teor de sólidos*

Para conseguir padronizar a obtenção do teor de sólidos mediante aplicação de uma equação de uma maneira segura e rápida, 18 ensaios foram realizados com o objetivo de verificar a correta relação que é necessária para achar o teor de sólidos do rejeito de baixa densidade e confirmar o volume ótimo. A Tabela I.1 apresenta os resultados obtidos com volumes testados de 25, 50, 75, 100, 125 e 150 ml para conseguir um teor de sólidos de 16%. Uma análise dos dados obtidos mostra valores muito próximos, porém ao se avaliar a diferença entre as cápsulas é preferível utilizar-se volumes com pouca diferença, além de escolher um volume certo que não diminua consideravelmente o material avaliado.

Tabela I.1 - Determinação dos teores de sólidos com volumes predeterminados

Volume	Teor de Sólidos (%)			Média
	Cápsula 1	Cápsula 2	Cápsula 3	
25 ml	15,97	15,98	16,01	15,987
50 ml	15,99	16,01	16,02	16,007
75 ml	15,97	16,03	16,02	16,007
100 ml	15,95	15,99	16,03	15,990
125 ml	16,01	16,03	16,04	16,027
150 ml	15,98	16,01	16,05	16,013
Média	15,978	16,008	16,028	<b>16,005</b>

Para realizar o procedimento do cálculo do teor de sólidos foi necessário tarar as cápsulas e conhecer o valor da massa dos seis volumes predeterminados do rejeito que foi considerado como o denominador da equação, sendo um total de 18 cápsulas taradas e pesadas. Depois, colocou-as na estufa para secagem de acordo com as recomendações na norma da ABNT (NBR 6457). A Figura I.1 mostra todas as cápsulas retiradas da estufa, as quais foram pesadas para conhecer o valor da massa do rejeito seco. Esse valor obtido foi considerado no numerador da equação para obter o teor de sólidos. Avaliados os valores apresentados na Tabela 5.1 foi arranjada a Equação 5.1 para obter o teor de sólidos do rejeito de fosfato e manter um padrão na hora de examinar atentamente o cumprimento do valor do teor de sólidos para os ensaios de sedimentação e adensamento por percolação.

$$S_w = \frac{m_d}{m_{50}} * 100 \quad 5.1$$

Onde:

$Sw$  é o teor de sólidos do rejeito de fosfato, em porcentagem;  
 $m_d$  é a massa do rejeito seco da amostra em 50 ml, em gramas;  
 $m_{50}$  é a massa da amostra (água e sólidos) em 50 ml, em gramas.

Os volumes utilizados para testar a amostra de rejeito de fosfato mostraram uma média exata de 16% que comparada com cada um dos 6 volumes mostraram diferenças quase imperceptíveis, com exceção do volume de 125 ml que foi o valor mais afastado dos resultados. As cápsulas com volume de 50 ml apresentaram maior proximidade com a média, por isso foi recomendável utilizar esse volume no caso de rejeito de fosfato. Também foi considerado o volume de 50 ml do que seus concorrentes devido ao benefício para realizar os ensaios desta pesquisa (sedimentação e adensamento por percolação) sem perder uma considerável quantidade de amostra, perturbando ao mínimo os ensaios.



Figura I.1 – Cápsulas depois dos ensaios para obtenção da massa do rejeito seco em um volume de 50 ml.

A Figura I.1 também mostra claramente os cristais de Cloreto de Sódio, composto iônico cristalino, produzidos pela secagem na estufa acontecendo a maturação do arranjo cristalino do  $NaCl$ , onde os ânions  $Cl^-$  se ligam aos cátions  $Na^+$  corretamente. Estes cristais também formam parte do valor obtido da massa do rejeito seco, como consequência não é um valor fiel, porém durante todos os ensaios foram executados em conjunto (rejeito e Cloreto de Sódio), o que não teria uma influência prejudicial para os valores de teor de sólidos

## APÊNDICE J

Tabela J.1 – Velocidades de sedimentação para Sw de 8,5% ao longo do ensaio de coluna com sulfato de alumínio e sulfato de ferro (II) com concentrações de 20, 40 e 60 ppm

Sw = 8,5%									
Velocidade (cm/min)									
Temp o (min)	20 ppm			40 ppm			60 ppm		
	Natura l	Sulfato de Alumíni o	Sulfat o de Ferro (II)	Natura l	Sulfato de Alumínio	Sulfato de Ferro (II)	Natura l	Sulfato de Alumíni o	Sulfat o de Ferro (II)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0,08	0,08	0,00	0,08	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00
4	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
6	0,08	0,00	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
8	0,08	0,08	0,08	0,08	0,00	0,08	0,08	0,00	0,08
10	0,17	0,25	0,08	0,17	0,25	0,17	0,17	0,08	0,08
15	0,07	0,13	0,03	0,07	0,10	0,07	0,07	0,07	0,03
20	0,13	0,20	0,10	0,13	0,27	0,17	0,13	0,17	0,10
30	0,08	0,17	0,07	0,08	0,17	0,20	0,08	0,40	0,07
60	0,09	0,17	0,07	0,09	0,18	0,13	0,09	0,13	0,08
120	0,09	0,13	0,07	0,09	0,12	0,06	0,09	0,12	0,07
180	0,09	0,03	0,07	0,09	0,02	0,07	0,09	0,03	0,06
240	0,04	0,01	0,07	0,04	0,01	0,03	0,04	0,02	0,06
300	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03
360	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
420	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
480	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,06	0,01	0,01	0,01
1440	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2880	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4320	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5760	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8640	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10080	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11520	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12960	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14400	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15840	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17280	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18720	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>MAX</b>	<b>0,166</b>	<b>0,249</b>	<b>0,100</b>	<b>0,166</b>	<b>0,266</b>	<b>0,199</b>	<b>0,166</b>	<b>0,398</b>	<b>0,100</b>

Tabela J.2 – Velocidades de sedimentação para Sw de 8,5% ao longo do ensaio de coluna com sulfato de alumínio e sulfato de ferro (II) com concentrações de 80, 100 e 120 ppm

Sw = 8,5%									
Velocidade (cm/min)									
Tempo (min)	80 ppm			100 ppm			120 ppm		
	Natural	Sulfato de Alumínio	Sulfato de Ferro (II)	Natural	Sulfato de Alumínio	Sulfato de Ferro (II)	Natural	Sulfato de Alumínio	Sulfato de Ferro (II)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,08	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00
4	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
6	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
8	0,08	0,00	0,00	0,08	0,00	0,08	0,08	0,00	0,08
10	0,17	0,33	0,08	0,17	0,08	0,08	0,17	0,00	0,08
15	0,07	0,03	0,07	0,07	0,10	0,03	0,07	0,07	0,07
20	0,13	0,17	0,07	0,13	0,10	0,10	0,13	0,07	0,13
30	0,08	0,13	0,08	0,08	0,13	0,13	0,08	0,07	0,10
60	0,09	0,20	0,09	0,09	0,13	0,07	0,09	0,14	0,10
120	0,09	0,12	0,07	0,09	0,12	0,08	0,09	0,12	0,07
180	0,09	0,03	0,06	0,09	0,06	0,06	0,09	0,07	0,07
240	0,04	0,02	0,06	0,04	0,02	0,05	0,04	0,02	0,04
300	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01
360	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
420	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
480	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01
1440	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2880	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4320	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5760	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8640	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10080	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11520	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12960	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14400	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15840	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17280	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18720	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>MAX</b>	<b>0,17</b>	<b>0,33</b>	<b>0,09</b>	<b>0,17</b>	<b>0,13</b>	<b>0,13</b>	<b>0,17</b>	<b>0,14</b>	<b>0,13</b>

Tabela J.3 – Velocidades de sedimentação para Sw de 11% ao longo do ensaio de coluna com sulfato de alumínio e sulfato de ferro (II) com concentrações de 20, 40 e 60 ppm

Sw = 11%									
Velocidade (cm/min)									
Tempo (min)	20 ppm			40 ppm			60 ppm		
	Natural	Sulfato de Alumínio	Sulfato de Ferro (II)	Natural	Sulfato de Alumínio	Sulfato de Ferro (II)	Natural	Sulfato de Alumínio	Sulfato de Ferro (II)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,08	0,00	0,08	0,00	0,00	0,08	0,00
8	0,08	0,08	0,00	0,08	0,00	0,08	0,08	0,00	0,08
10	0,00	0,08	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,08	0,00
15	0,03	0,00	0,03	0,03	0,00	0,03	0,03	0,00	0,03
20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,03	0,00
30	0,02	0,00	0,05	0,02	0,05	0,05	0,02	0,02	0,03
60	0,05	0,03	0,05	0,05	0,02	0,04	0,05	0,08	0,04
120	0,07	0,10	0,06	0,07	0,13	0,05	0,07	0,10	0,05
180	0,07	0,09	0,06	0,07	0,07	0,04	0,07	0,06	0,04
240	0,07	0,02	0,07	0,07	0,02	0,05	0,07	0,02	0,06
300	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,04	0,02	0,01	0,04
360	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
420	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
480	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
1440	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2880	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4320	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5760	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8640	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10080	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11520	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12960	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14400	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15840	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17280	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18720	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>MAX</b>	<b>0,08</b>	<b>0,10</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,13</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,10</b>	<b>0,08</b>

Tabela J.4 – Velocidades de sedimentação para Sw de 11% ao longo do ensaio de coluna com sulfato de alumínio e sulfato de ferro (II) com concentrações de 80, 100 e 120 ppm

Sw = 11%									
Velocidade (cm/min)									
Tempo (min)	80 ppm			100 ppm			120 ppm		
	Natural	Sulfato de Alumínio	Sulfato de Ferro (II)	Natural	Sulfato de Alumínio	Sulfato de Ferro (II)	Natural	Sulfato de Alumínio	Sulfato de Ferro (II)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,08	0,00	0,00	0,08
8	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,00	0,08	0,08	0,00
10	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,08	0,00
15	0,03	0,00	0,03	0,03	0,03	0,00	0,03	0,00	0,03
20	0,00	0,03	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,07	0,00
30	0,02	0,03	0,03	0,02	0,07	0,03	0,02	0,05	0,05
60	0,05	0,09	0,04	0,05	0,09	0,06	0,05	0,09	0,05
120	0,07	0,08	0,05	0,07	0,11	0,05	0,07	0,10	0,05
180	0,07	0,08	0,04	0,07	0,03	0,04	0,07	0,03	0,04
240	0,07	0,02	0,04	0,07	0,01	0,04	0,07	0,01	0,04
300	0,02	0,01	0,05	0,02	0,01	0,05	0,02	0,01	0,05
360	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
420	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
480	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
1440	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2880	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4320	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5760	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8640	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10080	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11520	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12960	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14400	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15840	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17280	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18720	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>MAX</b>	<b>0,08</b>	<b>0,09</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,11</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,10</b>	<b>0,08</b>



Tabela J.5 – Velocidades de sedimentação para Sw de 13,5% ao longo do ensaio de coluna com sulfato de alumínio e sulfato de ferro (II) com concentrações de 20, 40 e 80 ppm

Sw = 13,5%									
Velocidade (cm/min)									
Tempo (min)	20 ppm			40 ppm			60 ppm		
	Natural	Sulfato de Alumínio	Sulfato de Ferro (II)	Natural	Sulfato de Alumínio	Sulfato de Ferro (II)	Natural	Sulfato de Alumínio	Sulfato de Ferro (II)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,08	0,00
8	0,00	0,00	0,08	0,00	0,08	0,08	0,00	0,00	0,00
10	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08
15	0,03	0,03	0,03	0,03	0,07	0,03	0,03	0,07	0,03
20	0,03	0,07	0,00	0,03	0,07	0,00	0,03	0,00	0,00
30	0,03	0,07	0,03	0,03	0,07	0,03	0,03	0,08	0,03
60	0,05	0,08	0,04	0,05	0,11	0,05	0,05	0,09	0,03
120	0,03	0,09	0,04	0,03	0,07	0,04	0,03	0,09	0,04
180	0,08	0,04	0,04	0,08	0,02	0,03	0,08	0,02	0,04
240	0,05	0,02	0,06	0,05	0,02	0,04	0,05	0,01	0,03
300	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,04	0,02	0,01	0,05
360	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
420	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
480	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
1440	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2880	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4320	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5760	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8640	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10080	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11520	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12960	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14400	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15840	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17280	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18720	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>MAX</b>	<b>0,08</b>	<b>0,09</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,11</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,09</b>	<b>0,08</b>

Tabela J.6 – Velocidades de sedimentação para Sw de 13,5% ao longo do ensaio de coluna com sulfato de alumínio e sulfato de ferro (II) com concentrações de 80, 100 e 120 ppm

Sw = 13,5%									
Velocidade (cm/min)									
Tempo (min)	80 ppm			100 ppm			120 ppm		
	Natural	Sulfato de Alumínio	Sulfato de Ferro (II)	Natural	Sulfato de Alumínio	Sulfato de Ferro (II)	Natural	Sulfato de Alumínio	Sulfato de Ferro (II)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00
4	0,00	0,08	0,00	0,00	0,17	0,08	0,00	0,08	0,00
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08
8	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,08
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00
15	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,00	0,03	0,03	0,00
20	0,03	0,03	0,00	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
30	0,03	0,08	0,03	0,03	0,07	0,05	0,03	0,12	0,02
60	0,05	0,10	0,04	0,05	0,10	0,03	0,05	0,08	0,03
120	0,03	0,07	0,04	0,03	0,07	0,03	0,03	0,08	0,04
180	0,08	0,02	0,03	0,08	0,02	0,03	0,08	0,02	0,03
240	0,05	0,01	0,03	0,05	0,01	0,03	0,05	0,01	0,03
300	0,02	0,01	0,05	0,02	0,01	0,05	0,02	0,01	0,04
360	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
420	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
480	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
1440	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2880	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4320	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5760	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8640	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10080	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11520	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12960	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14400	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15840	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17280	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18720	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>MAX</b>	<b>0,08</b>	<b>0,10</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,17</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,12</b>	<b>0,08</b>

## APÊNDICE K

Tabela K.1 – Velocidades de sedimentação para Sw de 8,5% ao longo do ensaio de coluna com sulfato de alumínio e C-498 com concentrações de 20, 40 e 60 ppm

Sw = 8,5%									
Velocidade (cm/min)									
Tempo (min)	20 ppm			40 ppm			60 ppm		
	Natural	Sulfato de Alumínio	C-498	Natural	Sulfato de Alumínio	C-498	Natural	Sulfato de Alumínio	C-498
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,08	0,08	0,50	0,08	0,00	0,83	0,08	0,00	1,00
4	0,08	0,08	0,17	0,08	0,08	0,50	0,08	0,08	0,33
6	0,08	0,00	0,17	0,08	0,08	0,17	0,08	0,08	0,17
8	0,08	0,08	0,08	0,08	0,00	0,17	0,08	0,00	0,17
10	0,17	0,25	0,08	0,17	0,25	0,17	0,17	0,08	0,17
15	0,07	0,13	0,10	0,07	0,10	0,13	0,07	0,07	0,07
20	0,13	0,20	0,10	0,13	0,27	0,20	0,13	0,17	0,20
30	0,08	0,17	0,12	0,08	0,17	0,17	0,08	0,40	0,13
60	0,09	0,17	0,11	0,09	0,18	0,20	0,09	0,13	0,13
120	0,09	0,13	0,11	0,09	0,12	0,06	0,09	0,12	0,11
180	0,09	0,03	0,07	0,09	0,02	0,02	0,09	0,03	0,03
240	0,04	0,01	0,02	0,04	0,01	0,01	0,04	0,02	0,01
300	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
360	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
420	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
480	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
1440	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2880	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4320	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5760	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8640	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10080	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11520	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12960	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14400	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15840	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17280	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18720	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>MAX</b>	<b>0,166</b>	<b>0,249</b>	<b>0,498</b>	<b>0,166</b>	<b>0,266</b>	<b>0,830</b>	<b>0,166</b>	<b>0,398</b>	<b>0,996</b>

Tabela K.2 – Velocidades de sedimentação para Sw de 8,5% ao longo do ensaio de coluna com sulfato de alumínio e C-498 com concentrações de 80, 100 e 120 ppm

Sw = 8,5%									
Velocidade (cm/min)									
Tempo (min)	Natural	80 ppm		Natural	100 ppm		Natural	120 ppm	
		Sulfato de Alumínio	C-498		Sulfato de Alumínio	C-498		Sulfato de Alumínio	C-498
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,08	0,00	0,66	0,08	0,00	0,33	0,08	0,00	0,33
4	0,08	0,08	0,66	0,08	0,08	0,33	0,08	0,08	0,33
6	0,08	0,08	0,66	0,08	0,08	0,33	0,08	0,08	0,17
8	0,08	0,00	0,66	0,08	0,00	0,33	0,08	0,00	0,50
10	0,17	0,33	0,66	0,17	0,08	0,17	0,17	0,00	0,33
15	0,07	0,03	0,13	0,07	0,10	0,13	0,07	0,07	0,20
20	0,13	0,17	0,60	0,13	0,10	0,07	0,13	0,07	0,33
30	0,08	0,13	0,33	0,08	0,13	0,40	0,08	0,07	0,27
60	0,09	0,20	0,10	0,09	0,13	0,19	0,09	0,14	0,18
120	0,09	0,12	0,03	0,09	0,12	0,05	0,09	0,12	0,04
180	0,09	0,03	0,02	0,09	0,06	0,02	0,09	0,07	0,02
240	0,04	0,02	0,02	0,04	0,02	0,02	0,04	0,02	0,02
300	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01
360	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
420	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
480	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01
1440	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2880	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4320	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5760	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8640	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10080	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11520	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12960	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14400	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15840	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17280	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18720	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>MAX</b>	<b>0,17</b>	<b>0,33</b>	<b>0,66</b>	<b>0,17</b>	<b>0,13</b>	<b>0,40</b>	<b>0,17</b>	<b>0,14</b>	<b>0,50</b>

Tabela K.3 – Velocidades de sedimentação para Sw de 11% ao longo do ensaio de coluna com sulfato de alumínio e C-498 com concentrações de 20, 40 e 60 ppm

Sw = 11%									
Velocidade (cm/min)									
Tempo (min)	Natural	20 ppm		Natural	40 ppm		Natural	60 ppm	
		Sulfato de Alumínio	C-498		Sulfato de Alumínio	C-498		Sulfato de Alumínio	C-498
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,66	0,00	0,00	0,83	0,00	0,00	0,50
4	0,00	0,00	0,66	0,00	0,00	0,50	0,00	0,00	0,50
6	0,00	0,00	0,66	0,00	0,08	0,33	0,00	0,08	0,83
8	0,08	0,08	0,33	0,08	0,00	0,83	0,08	0,00	0,83
10	0,00	0,08	0,17	0,00	0,08	0,33	0,00	0,08	0,66
15	0,03	0,00	0,13	0,03	0,00	0,20	0,03	0,00	0,27
20	0,00	0,00	0,20	0,00	0,00	0,20	0,00	0,03	0,20
30	0,02	0,00	0,17	0,02	0,05	0,17	0,02	0,02	0,20
60	0,05	0,03	0,13	0,05	0,02	0,07	0,05	0,08	0,04
120	0,07	0,10	0,04	0,07	0,13	0,02	0,07	0,10	0,03
180	0,07	0,09	0,02	0,07	0,07	0,01	0,07	0,06	0,02
240	0,07	0,02	0,01	0,07	0,02	0,02	0,07	0,02	0,01
300	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
360	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
420	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
480	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
1440	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2880	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4320	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5760	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8640	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10080	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11520	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12960	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14400	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15840	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17280	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18720	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>MAX</b>	<b>0,08</b>	<b>0,10</b>	<b>0,66</b>	<b>0,08</b>	<b>0,13</b>	<b>0,83</b>	<b>0,08</b>	<b>0,10</b>	<b>0,83</b>

Tabela K.4 – Velocidades de sedimentação para Sw de 11% ao longo do ensaio de coluna com sulfato de alumínio e C-498 com concentrações de 80, 100 e 120 ppm

Sw = 11%									
Velocidade (cm/min)									
Tempo (min)	80 ppm			100 ppm			120 ppm		
	Natural	Sulfato de Alumínio	C-498	Natural	Sulfato de Alumínio	C-498	Natural	Sulfato de Alumínio	C-498
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,42	0,00	0,00	0,33	0,00	0,00	0,17
4	0,00	0,00	0,33	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,33
6	0,00	0,00	0,91	0,00	0,08	0,25	0,00	0,00	0,50
8	0,08	0,08	0,83	0,08	0,08	0,50	0,08	0,08	0,83
10	0,00	0,08	0,66	0,00	0,00	0,66	0,00	0,08	0,66
15	0,03	0,00	0,33	0,03	0,03	0,43	0,03	0,00	0,27
20	0,00	0,03	0,20	0,00	0,03	0,30	0,00	0,07	0,20
30	0,02	0,03	0,20	0,02	0,07	0,13	0,02	0,05	0,13
60	0,05	0,09	0,06	0,05	0,09	0,10	0,05	0,09	0,08
120	0,07	0,08	0,03	0,07	0,11	0,04	0,07	0,10	0,04
180	0,07	0,08	0,01	0,07	0,03	0,01	0,07	0,03	0,02
240	0,07	0,02	0,01	0,07	0,01	0,01	0,07	0,01	0,02
300	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
360	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
420	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
480	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
1440	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2880	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4320	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5760	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8640	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10080	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11520	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12960	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14400	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15840	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17280	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18720	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>MAX</b>	<b>0,08</b>	<b>0,09</b>	<b>0,91</b>	<b>0,08</b>	<b>0,11</b>	<b>0,66</b>	<b>0,08</b>	<b>0,10</b>	<b>0,83</b>

Tabela K.5 – Velocidades de sedimentação para Sw de 13,5% ao longo do ensaio de coluna com sulfato de alumínio e C-498 com concentrações de 20, 40 e 80 ppm

Sw = 13,5%									
Velocidade (cm/min)									
Tempo (min)	20 ppm			40 ppm			60 ppm		
	Natural	Sulfato de Alumínio	C-498	Natural	Sulfato de Alumínio	C-498	Natural	Sulfato de Alumínio	C-498
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,17	0,00	0,00	0,17
4	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,17	0,00	0,08	0,17
6	0,00	0,00	0,17	0,00	0,08	0,17	0,00	0,08	0,17
8	0,00	0,00	0,17	0,00	0,08	0,17	0,00	0,00	0,33
10	0,00	0,08	0,17	0,00	0,00	0,17	0,00	0,00	0,33
15	0,03	0,03	0,07	0,03	0,07	0,07	0,03	0,07	0,27
20	0,03	0,07	0,13	0,03	0,07	0,20	0,03	0,00	0,27
30	0,03	0,07	0,10	0,03	0,07	0,13	0,03	0,08	0,17
60	0,05	0,08	0,04	0,05	0,11	0,08	0,05	0,09	0,13
120	0,03	0,09	0,09	0,03	0,07	0,08	0,03	0,09	0,03
180	0,08	0,04	0,02	0,08	0,02	0,02	0,08	0,02	0,02
240	0,05	0,02	0,02	0,05	0,02	0,01	0,05	0,01	0,01
300	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
360	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00
420	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
480	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01
1440	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2880	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4320	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5760	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8640	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10080	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11520	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12960	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14400	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15840	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17280	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18720	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>MAX</b>	<b>0,08</b>	<b>0,09</b>	<b>0,17</b>	<b>0,08</b>	<b>0,11</b>	<b>0,20</b>	<b>0,08</b>	<b>0,09</b>	<b>0,33</b>

Tabela 5.6 – Velocidades de sedimentação para Sw de 13,5% ao longo do ensaio de coluna com sulfato de alumínio e C-498 com concentrações de 80, 100 e 120 ppm

Sw = 13,5%									
Velocidade (cm/min)									
Tempo (min)	Natural	80 ppm		Natural	100 ppm		Natural	120 ppm	
		Sulfato de Alumínio	C-498		Sulfato de Alumínio	C-498		Sulfato de Alumínio	C-498
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,08	0,50	0,00	0,00	0,33	0,00	0,08	0,42
4	0,00	0,08	0,17	0,00	0,17	0,08	0,00	0,08	0,25
6	0,00	0,00	0,17	0,00	0,00	0,17	0,00	0,00	0,17
8	0,00	0,00	0,17	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00	0,17
10	0,00	0,00	0,17	0,00	0,00	0,33	0,00	0,08	0,25
15	0,03	0,03	0,20	0,03	0,03	0,13	0,03	0,03	0,30
20	0,03	0,03	0,20	0,03	0,03	0,23	0,03	0,03	0,13
30	0,03	0,08	0,15	0,03	0,07	0,12	0,03	0,12	0,17
60	0,05	0,10	0,12	0,05	0,10	0,10	0,05	0,08	0,11
120	0,03	0,07	0,03	0,03	0,07	0,04	0,03	0,08	0,03
180	0,08	0,02	0,02	0,08	0,02	0,01	0,08	0,02	0,01
240	0,05	0,01	0,01	0,05	0,01	0,01	0,05	0,01	0,01
300	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
360	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
420	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
480	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
1440	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2880	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4320	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5760	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8640	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10080	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11520	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12960	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14400	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15840	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17280	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18720	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>MAX</b>	<b>0,08</b>	<b>0,10</b>	<b>0,50</b>	<b>0,08</b>	<b>0,17</b>	<b>0,33</b>	<b>0,08</b>	<b>0,12</b>	<b>0,42</b>



Tabela K.7 – Velocidades de sedimentação para Sw de 16% ao longo do ensaio de coluna com sulfato de alumínio e C-498 com concentrações de 20, 40 e 80 ppm

Sw = 16%									
Velocidade (cm/min)									
Tempo (min)	Natural	20 ppm		Natural	40 ppm		Natural	60 ppm	
		Sulfato de Alumínio	C-498		Sulfato de Alumínio	C-498		Sulfato de Alumínio	C-498
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,42	0,00	0,00	0,42	0,00	0,00	0,33
4	0,00	0,00	0,41	0,00	0,08	0,25	0,00	0,17	0,08
6	0,00	0,08	0,33	0,00	0,08	0,33	0,00	0,00	0,25
8	0,00	0,00	0,17	0,00	0,00	0,17	0,00	0,00	0,17
10	0,00	0,08	0,17	0,00	0,00	0,17	0,00	0,17	0,17
15	0,03	0,03	0,13	0,03	0,03	0,13	0,03	0,00	0,27
20	0,03	0,00	0,27	0,03	0,00	0,20	0,03	0,00	0,23
30	0,03	0,02	0,17	0,03	0,02	0,18	0,03	0,03	0,12
60	0,05	0,08	0,06	0,05	0,08	0,06	0,05	0,09	0,06
120	0,03	0,05	0,03	0,03	0,05	0,02	0,03	0,04	0,03
180	0,08	0,02	0,01	0,08	0,02	0,01	0,08	0,02	0,01
240	0,05	0,01	0,01	0,05	0,01	0,01	0,05	0,01	0,01
300	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
360	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
420	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
480	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01
1440	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2880	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4320	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5760	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8640	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10080	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11520	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12960	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14400	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15840	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17280	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18720	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>MAX</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,42</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,42</b>	<b>0,08</b>	<b>0,17</b>	<b>0,33</b>

Tabela K.8 – Velocidades de sedimentação para Sw de 16% ao longo do ensaio de coluna com sulfato de alumínio e C-498 com concentrações de 80, 100 e 120 ppm

Sw = 16%									
Velocidade (cm/min)									
Tempo (min)	80 ppm			100 ppm			120 ppm		
	Natural	Sulfato de Alumínio	C-498	Natural	Sulfato de Alumínio	C-498	Natural	Sulfato de Alumínio	C-498
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,50	0,00	0,00	0,17	0,00	0,08	0,33
4	0,00	0,08	0,08	0,00	0,08	0,08	0,00	0,08	0,33
6	0,00	0,08	0,08	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00	0,08
8	0,00	0,00	0,17	0,00	0,08	0,08	0,00	0,00	0,17
10	0,00	0,08	0,33	0,00	0,17	0,08	0,00	0,08	0,17
15	0,03	0,03	0,13	0,03	0,00	0,17	0,03	0,03	0,23
20	0,03	0,00	0,23	0,03	0,00	0,37	0,03	0,03	0,20
30	0,03	0,03	0,15	0,03	0,03	0,13	0,03	0,12	0,13
60	0,05	0,09	0,06	0,05	0,09	0,06	0,05	0,08	0,06
120	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,08	0,02
180	0,08	0,02	0,01	0,08	0,02	0,01	0,08	0,02	0,02
240	0,05	0,01	0,01	0,05	0,01	0,01	0,05	0,01	0,01
300	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
360	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
420	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
480	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
1440	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2880	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4320	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5760	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8640	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10080	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11520	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12960	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14400	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15840	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17280	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18720	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>MAX</b>	<b>0,08</b>	<b>0,09</b>	<b>0,50</b>	<b>0,08</b>	<b>0,17</b>	<b>0,37</b>	<b>0,08</b>	<b>0,12</b>	<b>0,33</b>

Tabela K.9 – Velocidades de sedimentação para Sw de 18,5% ao longo do ensaio de coluna com sulfato de alumínio e C-498 com concentrações de 20, 40 e 80 ppm

Sw = 18,5%									
Velocidade (cm/min)									
Tempo (min)	Natural	20 ppm		Natural	40 ppm		Natural	60 ppm	
		Sulfato de Alumínio	C-498		Sulfato de Alumínio	C-498		Sulfato de Alumínio	C-498
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,33	0,00	0,00	0,33	0,00	0,00	0,50
4	0,00	0,08	0,17	0,00	0,08	0,08	0,00	0,00	0,17
6	0,00	0,00	0,17	0,00	0,08	0,17	0,00	0,17	0,17
8	0,00	0,08	0,17	0,00	0,00	0,17	0,00	0,00	0,08
10	0,00	0,00	0,17	0,00	0,00	0,17	0,00	0,00	0,08
15	0,03	0,03	0,07	0,03	0,07	0,10	0,03	0,07	0,13
20	0,03	0,03	0,13	0,03	0,00	0,07	0,03	0,00	0,07
30	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,07	0,03	0,03	0,03
60	0,05	0,07	0,03	0,05	0,08	0,03	0,05	0,08	0,03
120	0,03	0,04	0,01	0,03	0,03	0,01	0,03	0,03	0,02
180	0,08	0,02	0,01	0,08	0,02	0,01	0,08	0,02	0,01
240	0,05	0,01	0,01	0,05	0,01	0,01	0,05	0,01	0,01
300	0,02	0,01	0,00	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
360	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01
420	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01
480	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01
1440	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2880	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4320	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5760	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8640	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10080	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11520	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12960	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14400	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15840	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17280	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18720	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>MAX</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,33</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,33</b>	<b>0,08</b>	<b>0,17</b>	<b>0,50</b>

Tabela K.10 – Velocidades de sedimentação para Sw de 18,5% ao longo do ensaio de coluna com sulfato de alumínio e C-498 com concentrações de 80, 100 e 120 ppm

Sw = 18,5%									
Velocidade (cm/min)									
Tempo (min)	Natural	80 ppm		Natural	100 ppm		Natural	120 ppm	
		Sulfato de Alumínio	C-498		Sulfato de Alumínio	C-498		Sulfato de Alumínio	C-498
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,42	0,00	0,00	0,66	0,00	0,00	0,50
4	0,00	0,08	0,08	0,00	0,08	0,08	0,00	0,08	0,08
6	0,00	0,08	0,17	0,00	0,08	0,08	0,00	0,08	0,08
8	0,00	0,08	0,17	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,08
10	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,08
15	0,03	0,03	0,07	0,03	0,07	0,07	0,03	0,07	0,07
20	0,03	0,00	0,10	0,03	0,00	0,07	0,03	0,03	0,07
30	0,03	0,03	0,05	0,03	0,07	0,05	0,03	0,05	0,07
60	0,05	0,08	0,03	0,05	0,07	0,03	0,05	0,07	0,03
120	0,03	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,01
180	0,08	0,02	0,01	0,08	0,01	0,01	0,08	0,01	0,01
240	0,05	0,01	0,01	0,05	0,01	0,01	0,05	0,01	0,01
300	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,00
360	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
420	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00
480	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01
1440	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2880	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4320	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5760	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8640	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10080	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11520	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12960	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14400	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15840	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17280	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18720	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>MAX</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,42</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,66</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,50</b>

Tabela K.11 – Velocidades de sedimentação para Sw de 21% ao longo do ensaio de coluna com sulfato de alumínio e C-498 com concentrações de 20, 40 e 80 ppm

Sw = 21%									
Velocidade (cm/min)									
Tempo (min)	20 ppm			40 ppm			60 ppm		
	Natural	Sulfato de Alumínio	C-498	Natural	Sulfato de Alumínio	C-498	Natural	Sulfato de Alumínio	C-498
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00	0,42	0,00	0,08	0,25
4	0,00	0,00	0,25	0,00	0,08	0,17	0,00	0,08	0,08
6	0,00	0,00	0,17	0,00	0,00	0,17	0,00	0,00	0,17
8	0,00	0,08	0,17	0,00	0,08	0,17	0,00	0,00	0,25
10	0,00	0,08	0,17	0,00	0,00	0,17	0,00	0,08	0,17
15	0,03	0,00	0,07	0,03	0,07	0,10	0,03	0,03	0,10
20	0,03	0,03	0,07	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,07
30	0,03	0,03	0,07	0,03	0,08	0,05	0,03	0,12	0,07
60	0,05	0,03	0,02	0,05	0,00	0,02	0,05	0,08	0,02
120	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03	0,08	0,01
180	0,08	0,01	0,01	0,08	0,01	0,01	0,08	0,02	0,01
240	0,05	0,01	0,01	0,05	0,01	0,01	0,05	0,01	0,01
300	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,00	0,02	0,01	0,01
360	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01
420	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00
480	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00
1440	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2880	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4320	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5760	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8640	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10080	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11520	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12960	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14400	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15840	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17280	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18720	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>MAX</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,25</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,42</b>	<b>0,08</b>	<b>0,12</b>	<b>0,25</b>

Tabela K.12 – Velocidades de sedimentação para Sw de 21% ao longo do ensaio de coluna com sulfato de alumínio e C-498 com concentrações de 80, 100 e 120 ppm

Sw = 21%									
Velocidade (cm/min)									
Tempo (min)	80 ppm			100 ppm			120 ppm		
	Natural	Sulfato de Alumínio	C-498	Natural	Sulfato de Alumínio	C-498	Natural	Sulfato de Alumínio	C-498
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,17	0,00	0,00	0,33	0,00	0,00	0,50
4	0,00	0,00	0,17	0,00	0,00	0,17	0,00	0,00	0,17
6	0,00	0,08	0,17	0,00	0,08	0,17	0,00	0,08	0,17
8	0,00	0,08	0,17	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,17
10	0,00	0,00	0,17	0,00	0,00	0,08	0,00	0,08	0,17
15	0,03	0,00	0,07	0,03	0,03	0,07	0,03	0,00	0,07
20	0,03	0,03	0,07	0,03	0,00	0,07	0,03	0,00	0,07
30	0,03	0,02	0,07	0,03	0,03	0,07	0,03	0,03	0,03
60	0,05	0,02	0,03	0,05	0,01	0,02	0,05	0,02	0,02
120	0,03	0,01	0,01	0,03	0,02	0,01	0,03	0,01	0,01
180	0,08	0,01	0,01	0,08	0,01	0,01	0,08	0,01	0,01
240	0,05	0,01	0,01	0,05	0,01	0,01	0,05	0,01	0,01
300	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
360	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01
420	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00
480	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00
1440	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2880	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4320	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5760	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8640	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10080	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11520	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12960	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14400	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15840	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17280	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18720	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>MAX</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,17</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,33</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,50</b>

## APÊNDICE L

Tabela L.1 – Velocidades de sedimentação para Sw de 8,5% ao longo do ensaio de coluna com coagulante com concentrações de 20, 40 e 60 ppm para rejeito secado e normal

Sw = 8,5%												
Velocidade (cm/min)												
Tempo (min)	Estufa		Normal		Estufa		Normal		Estufa		Normal	
	Natural	20 ppm	Natural	20 ppm	Natural	40 ppm	Natural	40 ppm	Natural	60 ppm	Natural	60 ppm
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,33	0,17	0,08	0,08	0,33	0,17	0,08	0,00	0,33	0,33	0,08	0,00
4	0,17	0,25	0,08	0,08	0,17	0,17	0,08	0,08	0,17	0,17	0,08	0,08
6	0,33	0,25	0,08	0,00	0,33	0,17	0,08	0,08	0,33	0,25	0,08	0,08
8	0,17	0,17	0,08	0,08	0,17	0,17	0,08	0,00	0,17	0,25	0,08	0,00
10	0,25	0,17	0,17	0,25	0,25	0,41	0,17	0,25	0,25	0,42	0,17	0,08
15	0,23	0,13	0,07	0,13	0,23	0,17	0,07	0,10	0,23	0,23	0,07	0,07
20	0,27	0,33	0,13	0,20	0,27	0,43	0,13	0,27	0,27	0,40	0,13	0,17
30	0,23	0,27	0,08	0,17	0,23	0,33	0,08	0,17	0,23	0,23	0,08	0,40
60	0,25	0,29	0,09	0,17	0,25	0,27	0,09	0,18	0,25	0,28	0,09	0,13
120	0,15	0,15	0,09	0,13	0,15	0,15	0,09	0,12	0,15	0,15	0,09	0,12
180	0,04	0,03	0,09	0,03	0,04	0,03	0,09	0,02	0,04	0,02	0,09	0,03
240	0,01	0,01	0,04	0,01	0,01	0,01	0,04	0,01	0,01	0,01	0,04	0,02
300	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
360	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01
420	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01
480	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01
1440	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2880	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4320	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5760	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8640	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10080	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11520	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12960	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14400	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15840	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17280	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18720	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MAX	0,33	0,33	0,17	0,25	0,33	0,43	0,17	0,27	0,33	0,42	0,17	0,40

Tabela L.2 – Velocidades de sedimentação para Sw de 8,5% ao longo do ensaio de coluna com coagulante com concentrações de 80, 100 e 120 ppm para rejeito secado e normal

Sw = 8,5%												
Velocidade (cm/min)												
Temp o (min)	Estufa		Normal		Estufa		Normal		Estufa		Normal	
	Natural	80 ppm	Natural	80 ppm	Natural	100 ppm	Natural	100 ppm	Natural	120 ppm	Natural	120 ppm
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,33	0,25	0,08	0,00	0,33	0,17	0,08	0,00	0,33	0,25	0,08	0,00
4	0,17	0,25	0,08	0,08	0,17	0,17	0,08	0,08	0,17	0,25	0,08	0,08
6	0,33	0,17	0,08	0,08	0,33	0,17	0,08	0,08	0,33	0,17	0,08	0,08
8	0,17	0,33	0,08	0,00	0,17	0,42	0,08	0,00	0,17	0,50	0,08	0,00
10	0,25	0,75	0,17	0,33	0,25	0,41	0,17	0,08	0,25	0,33	0,17	0,00
15	0,23	0,10	0,07	0,03	0,23	0,27	0,07	0,10	0,23	0,17	0,07	0,07
20	0,27	0,33	0,13	0,17	0,27	0,40	0,13	0,10	0,27	0,37	0,13	0,07
30	0,23	0,30	0,08	0,13	0,23	0,27	0,08	0,13	0,23	0,27	0,08	0,07
60	0,25	0,27	0,09	0,20	0,25	0,30	0,09	0,13	0,25	0,28	0,09	0,14
120	0,15	0,15	0,09	0,12	0,15	0,15	0,09	0,12	0,15	0,15	0,09	0,12
180	0,04	0,02	0,09	0,03	0,04	0,01	0,09	0,06	0,04	0,02	0,09	0,07
240	0,01	0,01	0,04	0,02	0,01	0,01	0,04	0,02	0,01	0,01	0,04	0,02
300	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
360	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01
420	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01
480	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00
1440	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2880	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4320	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5760	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8640	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10080	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11520	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12960	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14400	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15840	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17280	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18720	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>MAX</b>	<b>0,33</b>	<b>0,75</b>	<b>0,17</b>	<b>0,33</b>	<b>0,33</b>	<b>0,42</b>	<b>0,17</b>	<b>0,13</b>	<b>0,33</b>	<b>0,50</b>	<b>0,17</b>	<b>0,14</b>



Tabela L.3 – Velocidades de sedimentação para Sw de 11% ao longo do ensaio de coluna com coagulante com concentrações de 20, 40 e 60 ppm para rejeito secado e normal

Sw = 11%												
Velocidade (cm/min)												
Tempo (min)	Estufa		Normal		Estufa		Normal		Estufa		Normal	
	Natural	20 ppm	Natural	20 ppm	Natural	40 ppm	Natural	40 ppm	Natural	60 ppm	Natural	60 ppm
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,17	0,00	0,00	0,00	0,17	0,00	0,00	0,00	0,17	0,08	0,00	0,00
4	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00
6	0,17	0,08	0,00	0,00	0,17	0,08	0,00	0,08	0,17	0,08	0,00	0,08
8	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,17	0,08	0,00	0,08	0,08	0,08	0,00
10	0,08	0,17	0,00	0,08	0,08	0,08	0,00	0,08	0,08	0,25	0,00	0,08
15	0,07	0,07	0,03	0,00	0,07	0,10	0,03	0,00	0,07	0,03	0,03	0,00
20	0,10	0,10	0,00	0,00	0,10	0,07	0,00	0,00	0,10	0,10	0,00	0,03
30	0,08	0,07	0,02	0,00	0,08	0,08	0,02	0,05	0,08	0,08	0,02	0,02
60	0,07	0,08	0,05	0,03	0,07	0,07	0,05	0,02	0,07	0,07	0,05	0,08
120	0,07	0,08	0,07	0,10	0,07	0,07	0,07	0,13	0,07	0,07	0,07	0,10
180	0,08	0,07	0,07	0,09	0,08	0,07	0,07	0,07	0,08	0,07	0,07	0,06
240	0,06	0,07	0,07	0,02	0,06	0,07	0,07	0,02	0,06	0,07	0,07	0,02
300	0,07	0,05	0,02	0,02	0,07	0,04	0,02	0,01	0,07	0,06	0,02	0,01
360	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
420	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
480	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
1440	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2880	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4320	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5760	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8640	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10080	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11520	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12960	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14400	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15840	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17280	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18720	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>MAX</b>	<b>0,17</b>	<b>0,17</b>	<b>0,08</b>	<b>0,10</b>	<b>0,17</b>	<b>0,17</b>	<b>0,08</b>	<b>0,13</b>	<b>0,17</b>	<b>0,25</b>	<b>0,08</b>	<b>0,10</b>

Tabela L.4 – Velocidades de sedimentação para Sw de 11% ao longo do ensaio de coluna com coagulante com concentrações de 80, 100 e 120 ppm para rejeito secado e normal

Sw = 11%												
Velocidade (cm/min)												
Tempo (min)	Estufa		Normal		Estufa		Normal		Estufa		Normal	
	Natural	80 ppm	Natural	80 ppm	Natural	100 ppm	Natural	100 ppm	Natural	120 ppm	Natural	120 ppm
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,17	0,00	0,00	0,00	0,17	0,00	0,00	0,00	0,17	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,17	0,00	0,00	0,00	0,17	0,00	0,00	0,00	0,17	0,00	0,00
6	0,17	0,00	0,00	0,00	0,17	0,08	0,00	0,08	0,17	0,08	0,00	0,00
8	0,08	0,17	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
10	0,08	0,17	0,00	0,08	0,08	0,08	0,00	0,00	0,08	0,08	0,00	0,08
15	0,07	0,07	0,03	0,00	0,07	0,07	0,03	0,03	0,07	0,10	0,03	0,00
20	0,10	0,07	0,00	0,03	0,10	0,10	0,00	0,03	0,10	0,07	0,00	0,07
30	0,08	0,08	0,02	0,03	0,08	0,07	0,02	0,07	0,08	0,07	0,02	0,05
60	0,07	0,07	0,05	0,09	0,07	0,08	0,05	0,09	0,07	0,07	0,05	0,09
120	0,07	0,07	0,07	0,08	0,07	0,07	0,07	0,11	0,07	0,07	0,07	0,10
180	0,08	0,07	0,07	0,08	0,08	0,07	0,07	0,03	0,08	0,06	0,07	0,03
240	0,06	0,07	0,07	0,02	0,06	0,06	0,07	0,01	0,06	0,06	0,07	0,01
300	0,07	0,04	0,02	0,01	0,07	0,06	0,02	0,01	0,07	0,07	0,02	0,01
360	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
420	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
480	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
1440	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2880	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4320	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5760	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8640	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10080	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11520	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12960	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14400	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15840	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17280	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18720	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>MAX</b>	<b>0,17</b>	<b>0,17</b>	<b>0,08</b>	<b>0,09</b>	<b>0,17</b>	<b>0,17</b>	<b>0,08</b>	<b>0,11</b>	<b>0,17</b>	<b>0,17</b>	<b>0,08</b>	<b>0,10</b>

Tabela L.5 – Velocidades de sedimentação para Sw de 13,5% ao longo do ensaio de coluna com coagulante com concentrações de 20, 40 e 60 ppm para rejeito secado e normal

Sw = 13,5%												
Velocidade (cm/min)												
Tempo (min)	Estufa		Normal		Estufa		Normal		Estufa		Normal	
	Natural	20 ppm	Natural	20 ppm	Natural	40 ppm	Natural	40 ppm	Natural	60 ppm	Natural	60 ppm
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,08
6	0,08	0,08	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,08	0,08	0,08	0,00	0,08
8	0,08	0,00	0,00	0,00	0,08	0,08	0,00	0,08	0,08	0,00	0,00	0,00
10	0,08	0,17	0,00	0,08	0,08	0,08	0,00	0,00	0,08	0,17	0,00	0,00
15	0,03	0,07	0,03	0,03	0,03	0,07	0,03	0,07	0,03	0,07	0,03	0,07
20	0,07	0,07	0,03	0,07	0,07	0,07	0,03	0,07	0,07	0,07	0,03	0,00
30	0,07	0,07	0,03	0,07	0,07	0,07	0,03	0,07	0,07	0,07	0,03	0,08
60	0,06	0,07	0,05	0,08	0,06	0,08	0,05	0,11	0,06	0,07	0,05	0,09
120	0,06	0,07	0,03	0,09	0,06	0,07	0,03	0,07	0,06	0,07	0,03	0,09
180	0,06	0,06	0,08	0,04	0,06	0,07	0,08	0,02	0,06	0,06	0,08	0,02
240	0,06	0,07	0,05	0,02	0,06	0,07	0,05	0,02	0,06	0,07	0,05	0,01
300	0,06	0,03	0,02	0,01	0,06	0,01	0,02	0,01	0,06	0,04	0,02	0,01
360	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
420	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
480	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
1440	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2880	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4320	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5760	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8640	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10080	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11520	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12960	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14400	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15840	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17280	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18720	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>MAX</b>	<b>0,08</b>	<b>0,17</b>	<b>0,08</b>	<b>0,09</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,11</b>	<b>0,08</b>	<b>0,17</b>	<b>0,08</b>	<b>0,09</b>

Tabela L.6 – Velocidades de sedimentação para Sw de 13,5% ao longo do ensaio de coluna com coagulante com concentrações de 80, 100 e 120 ppm para rejeito secado e normal

Sw = 13,5%												
Velocidade (cm/min)												
Tempo (min)	Estufa		Normal		Estufa		Normal		Estufa		Normal	
	Natural	80 ppm	Natural	80 ppm	Natural	100 ppm	Natural	100 ppm	Natural	120 ppm	Natural	120 ppm
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08
4	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,08	0,00	0,17	0,00	0,00	0,00	0,08
6	0,08	0,17	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,08	0,08	0,00	0,00
8	0,08	0,00	0,00	0,00	0,08	0,08	0,00	0,00	0,08	0,08	0,00	0,00
10	0,08	0,17	0,00	0,00	0,08	0,17	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,08
15	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,07	0,03	0,03
20	0,07	0,10	0,03	0,03	0,07	0,07	0,03	0,03	0,07	0,07	0,03	0,03
30	0,07	0,05	0,03	0,08	0,07	0,07	0,03	0,07	0,07	0,05	0,03	0,12
60	0,06	0,07	0,05	0,10	0,06	0,06	0,05	0,10	0,06	0,07	0,05	0,08
120	0,06	0,06	0,03	0,07	0,06	0,06	0,03	0,07	0,06	0,06	0,03	0,08
180	0,06	0,06	0,08	0,02	0,06	0,05	0,08	0,02	0,06	0,05	0,08	0,02
240	0,06	0,06	0,05	0,01	0,06	0,06	0,05	0,01	0,06	0,06	0,05	0,01
300	0,06	0,05	0,02	0,01	0,06	0,05	0,02	0,01	0,06	0,05	0,02	0,01
360	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
420	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
480	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
1440	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2880	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4320	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5760	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8640	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10080	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11520	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12960	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14400	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15840	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17280	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18720	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>MAX</b>	<b>0,08</b>	<b>0,17</b>	<b>0,08</b>	<b>0,10</b>	<b>0,08</b>	<b>0,17</b>	<b>0,08</b>	<b>0,17</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,12</b>

Tabela L.7 – Velocidades de sedimentação para Sw de 16% ao longo do ensaio de coluna com coagulante com concentrações de 20, 40 e 60 ppm para rejeito secado e normal

Sw = 16%												
Velocidade (cm/min)												
Tempo (min)	Estufa		Normal		Estufa		Normal		Estufa		Normal	
	Natural	20 ppm	Natural	20 ppm	Natural	40 ppm	Natural	40 ppm	Natural	60 ppm	Natural	60 ppm
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,17
6	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,00	0,08	0,00
8	0,08	0,00	0,00	0,00	0,08	0,08	0,00	0,00	0,08	0,08	0,00	0,00
10	0,00	0,08	0,08	0,08	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,08	0,17
15	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,07	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,00
20	0,03	0,03	0,00	0,00	0,03	0,07	0,00	0,00	0,03	0,13	0,00	0,00
30	0,07	0,07	0,02	0,02	0,07	0,03	0,02	0,02	0,07	0,03	0,02	0,03
60	0,04	0,05	0,04	0,08	0,04	0,06	0,04	0,08	0,04	0,06	0,04	0,09
120	0,05	0,05	0,06	0,05	0,05	0,05	0,06	0,05	0,05	0,05	0,06	0,04
180	0,04	0,05	0,02	0,02	0,04	0,05	0,02	0,02	0,04	0,05	0,02	0,02
240	0,05	0,05	0,01	0,01	0,05	0,04	0,01	0,01	0,05	0,07	0,01	0,01
300	0,05	0,06	0,01	0,01	0,05	0,05	0,01	0,01	0,05	0,03	0,01	0,01
360	0,03	0,01	0,01	0,01	0,03	0,02	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01
420	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
480	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
1440	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2880	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4320	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5760	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8640	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10080	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11520	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12960	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14400	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15840	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17280	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18720	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>MAX</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,13</b>	<b>0,08</b>	<b>0,17</b>

Tabela L.8 – Velocidades de sedimentação para Sw de 16% ao longo do ensaio de coluna com coagulante com concentrações de 80, 100 e 120 ppm para rejeito secado e normal

Sw = 16%												
Velocidade (cm/min)												
Tempo (min)	Estufa		Normal		Estufa		Normal		Estufa		Normal	
	Natural	80 ppm	Natural	80 ppm	Natural	100 ppm	Natural	100 ppm	Natural	120 ppm	Natural	120 ppm
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,08
6	0,08	0,00	0,08	0,08	0,08	0,00	0,08	0,00	0,08	0,00	0,08	0,00
8	0,08	0,08	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,08	0,08	0,08	0,00	0,08
10	0,00	0,00	0,08	0,08	0,00	0,08	0,08	0,17	0,00	0,08	0,08	0,00
15	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,00	0,03	0,10	0,03	0,03
20	0,03	0,07	0,00	0,00	0,03	0,07	0,00	0,00	0,03	0,07	0,00	0,03
30	0,07	0,07	0,02	0,03	0,07	0,07	0,02	0,03	0,07	0,05	0,02	0,03
60	0,04	0,06	0,04	0,09	0,04	0,06	0,04	0,09	0,04	0,06	0,04	0,10
120	0,05	0,06	0,06	0,04	0,05	0,06	0,06	0,04	0,05	0,04	0,06	0,04
180	0,04	0,05	0,02	0,02	0,04	0,05	0,02	0,02	0,04	0,05	0,02	0,02
240	0,05	0,07	0,01	0,01	0,05	0,06	0,01	0,01	0,05	0,06	0,01	0,01
300	0,05	0,02	0,01	0,01	0,05	0,04	0,01	0,01	0,05	0,04	0,01	0,01
360	0,03	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01
420	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
480	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
1440	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2880	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4320	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5760	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8640	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10080	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11520	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12960	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14400	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15840	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17280	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18720	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>MAX</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,09</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,17</b>	<b>0,08</b>	<b>0,10</b>	<b>0,08</b>	<b>0,10</b>

Tabela L.9 – Velocidades de sedimentação para Sw de 18,5% ao longo do ensaio de coluna com coagulante com concentrações de 20, 40 e 60 ppm para rejeito secado e normal

Sw = 18,5%												
Velocidade (cm/min)												
Tempo (min)	Estufa		Normal		Estufa		Normal		Estufa		Normal	
	Natural	20 ppm	Natural	20 ppm	Natural	40 ppm	Natural	40 ppm	Natural	60 ppm	Natural	60 ppm
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,08	0,08	0,00	0,00	0,08	0,17
8	0,08	0,08	0,00	0,08	0,08	0,08	0,00	0,00	0,08	0,08	0,00	0,00
10	0,08	0,08	0,08	0,00	0,08	0,08	0,08	0,00	0,08	0,08	0,08	0,00
15	0,03	0,03	0,00	0,03	0,03	0,07	0,00	0,07	0,03	0,07	0,00	0,07
20	0,03	0,03	0,00	0,03	0,03	0,03	0,00	0,00	0,03	0,03	0,00	0,00
30	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03
60	0,06	0,07	0,06	0,07	0,06	0,08	0,06	0,08	0,06	0,07	0,06	0,08
120	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,04	0,05	0,03	0,05	0,05	0,05	0,03
180	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02
240	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01
300	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
360	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01
420	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00
480	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
1440	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2880	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4320	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5760	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8640	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10080	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11520	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12960	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14400	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15840	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17280	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18720	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>MAX</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,17</b>

Tabela L.10 – Velocidades de sedimentação para Sw de 18,5% ao longo do ensaio de coluna com coagulante com concentrações de 80, 100 e 120 ppm para rejeito secado e normal

Sw = 18,5%												
Velocidade (cm/min)												
Tempo (min)	Estufa		Normal		Estufa		Normal		Estufa		Normal	
	Natural	80 ppm	Natural	80 ppm	Natural	100 ppm	Natural	100 ppm	Natural	120 ppm	Natural	120 ppm
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,08
6	0,00	0,00	0,08	0,08	0,00	0,00	0,08	0,08	0,00	0,00	0,08	0,08
8	0,08	0,00	0,00	0,08	0,08	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00
10	0,08	0,08	0,08	0,00	0,08	0,08	0,08	0,00	0,08	0,08	0,08	0,00
15	0,03	0,00	0,00	0,03	0,03	0,07	0,00	0,07	0,03	0,07	0,00	0,07
20	0,03	0,10	0,00	0,00	0,03	0,07	0,00	0,00	0,03	0,03	0,00	0,03
30	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,00	0,03	0,07	0,03	0,00	0,03	0,05
60	0,06	0,07	0,06	0,08	0,06	0,07	0,06	0,07	0,06	0,07	0,06	0,07
120	0,05	0,05	0,05	0,03	0,05	0,05	0,05	0,02	0,05	0,05	0,05	0,03
180	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,01	0,03	0,02	0,02	0,01
240	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01
300	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
360	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
420	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01
480	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00
1440	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2880	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4320	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5760	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8640	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10080	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11520	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12960	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14400	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15840	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17280	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18720	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>MAX</b>	<b>0,08</b>	<b>0,10</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>



Tabela L.11 – Velocidades de sedimentação para Sw de 21% ao longo do ensaio de coluna com coagulante com concentrações de 20, 40 e 60 ppm para rejeito secado e normal

Sw = 21%												
Velocidade (cm/min)												
Tempo (min)	Estufa		Normal		Estufa		Normal		Estufa		Normal	
	Natural	20 ppm	Natural	20 ppm	Natural	40 ppm	Natural	40 ppm	Natural	60 ppm	Natural	60 ppm
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08
8	0,00	0,08	0,08	0,08	0,00	0,08	0,08	0,08	0,00	0,17	0,08	0,08
10	0,08	0,08	0,00	0,08	0,08	0,08	0,00	0,00	0,08	0,08	0,00	0,00
15	0,03	0,03	0,03	0,00	0,03	0,03	0,03	0,07	0,03	0,03	0,03	0,00
20	0,03	0,07	0,00	0,03	0,03	0,07	0,00	0,03	0,03	0,07	0,00	0,03
30	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03	0,08	0,03	0,03	0,03	0,03
60	0,05	0,05	0,03	0,03	0,05	0,06	0,03	0,00	0,05	0,05	0,03	0,02
120	0,03	0,06	0,02	0,02	0,03	0,06	0,02	0,02	0,03	0,06	0,02	0,01
180	0,04	0,03	0,01	0,01	0,04	0,03	0,01	0,01	0,04	0,03	0,01	0,01
240	0,04	0,02	0,01	0,01	0,04	0,02	0,01	0,01	0,04	0,02	0,01	0,01
300	0,03	0,02	0,01	0,01	0,03	0,03	0,01	0,01	0,03	0,02	0,01	0,01
360	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
420	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
480	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00
1440	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2880	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4320	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5760	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8640	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10080	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11520	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12960	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14400	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15840	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17280	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18720	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>MAX</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,17</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>

Tabela L.12 – Velocidades de sedimentação para Sw de 21% ao longo do ensaio de coluna com coagulante com concentrações de 80, 100 e 120 ppm para rejeito secado e normal

Sw = 21%												
Velocidade (cm/min)												
Temp o (min)	Estufa		Normal		Estufa		Normal		Estufa		Normal	
	Natural	80 ppm	Natural	80 ppm	Natural	100 ppm	Natural	100 ppm	Natural	120 ppm	Natural	120 ppm
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,08
8	0,00	0,08	0,08	0,08	0,00	0,08	0,08	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00
10	0,08	0,08	0,00	0,00	0,08	0,08	0,00	0,00	0,08	0,08	0,00	0,08
15	0,03	0,03	0,03	0,00	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,07	0,03	0,00
20	0,03	0,10	0,00	0,03	0,03	0,07	0,00	0,00	0,03	0,03	0,00	0,00
30	0,03	0,02	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
60	0,05	0,06	0,03	0,02	0,05	0,05	0,03	0,01	0,05	0,05	0,03	0,02
120	0,03	0,02	0,02	0,01	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,01
180	0,04	0,06	0,01	0,01	0,04	0,06	0,01	0,01	0,04	0,06	0,01	0,01
240	0,04	0,02	0,01	0,01	0,04	0,02	0,01	0,01	0,04	0,02	0,01	0,01
300	0,03	0,03	0,01	0,01	0,03	0,03	0,01	0,01	0,03	0,04	0,01	0,01
360	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00
420	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00
480	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01
1440	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2880	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4320	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5760	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8640	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10080	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11520	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12960	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14400	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15840	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17280	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18720	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>MAX</b>	<b>0,08</b>	<b>0,10</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>

## DECLARAÇÃO DE INEXISTÊNCIA DE PLÁGIO

Eu *Christ Jesus Barriga Paria*, declaro que, a tese com título “ESTUDO DO PROCESSO DE SEDIMENTAÇÃO, COMPRESSIBILIDADE E ADENSAMENTO EM REJEITOS DE FOSFATO COM O USO DE COAGULANTES E FLOCULANTE”, com exceção das citações diretas e indiretas claramente indicadas e referenciadas, que este trabalho foi escrito por mim e, portanto, não contém plágio, tal como definidos pela legislação de direitos autorais em vigor no Brasil, Lei 9.610, de 19 de fevereiro de 1998.

Eu estou consciente que a utilização de material de terceiros incluindo uso de paráfrase sem a devida indicação das fontes será considerado plágio, e estarei sujeito a processo administrativo e outras sanções legais.

Ouro Preto, abril de 2021



---

*Christ Jesus Barriga Paria*  
CPF: 021.022.966-79

